ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

INGENIERO ELECTROMECÁNICO

Puesta a punto de un vehículo todoterreno para la navegación autónoma en la inspección de cultivos

Autor: Ignacio Olazabal Bernaldo de Quirós
Directora: Ángela Ribeiro Seijas

Madrid

Junio 2015

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN ACCESO *ABIERTO* (*RESTRINGIDO*) DE DOCUMENTACIÓN

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. Ignacio Olazabal Bernaldo de Quirós , como alumno de la UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS (COMILLAS), **DECLARA**

que es el titular de los derechos de propiedad intelectual, objeto de la presente cesión, en relación con la obra "Puesta a punto de un vehículo todoterreno para la navegación autónoma en la inspección de cultivos" [1], que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual como titular único o cotitular de la obra.

En caso de ser cotitular, el autor (firmante) declara asimismo que cuenta con el consentimiento de los restantes titulares para hacer la presente cesión. En caso de previa cesión a terceros de derechos de explotación de la obra, el autor declara que tiene la oportuna autorización de dichos titulares de derechos a los fines de esta cesión o bien que retiene la facultad de ceder estos derechos en la forma prevista en la presente cesión y así lo acredita.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad y hacer posible su utilización de *forma libre y gratuita* (*con las limitaciones que más adelante se detallan*) por todos los usuarios del repositorio y del portal e-ciencia, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución, de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra (a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión.

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia, el repositorio institucional podrá:

[1] Especificar si es una tesis doctoral, proyecto fin de carrera, proyecto fin de Máster o cualquier otro trabajo que deba ser objeto de evaluación académica

(a) Transformarla para adaptarla a cualquier tecnología susceptible de incorporarla a internet; realizar adaptaciones para hacer posible la utilización de la obra en formatos electrónicos, así como incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar "marcas de agua" o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.

(b) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato. .

(c) Comunicarla y ponerla a disposición del público a través de un archivo abierto institucional, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.[2]

(d) Distribuir copias electrónicas de la obra a los usuarios en un soporte digital. [3]

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra que cede con carácter no exclusivo a la Universidad por medio de su registro en el Repositorio Institucional tiene derecho a:

a) A que la Universidad identifique claramente su nombre como el autor o propietario de los derechos del documento.

b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.

c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada. A tal fin deberá ponerse en contacto con el vicerrector/a de investigación (curiarte@rec.upcomillas.es).

d) Autorizar expresamente a COMILLAS para, en su caso, realizar los trámites necesarios para la obtención del ISBN.

---

[2] En el supuesto de que el autor opte por el acceso restringido, este apartado quedaría redactado en los siguientes términos:

(c) Comunicarla y ponerla a disposición del público a través de un archivo institucional, accesible de modo restringido, en los términos previstos en el Reglamento del Repositorio Institucional

[3] En el supuesto de que el autor opte por el acceso restringido, este apartado quedaría eliminado.

d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.

b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.

c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.

d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

a) Deberes del repositorio Institucional:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.

- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.

- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.

b) Derechos que se reserva el Repositorio institucional respecto de las obras en él registradas:

- retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 15 de junio de 2015

ACEPTA

Fdo. Ignacio Olazabal

Proyecto realizado por el alumno/a:

Ignacio Olazabal Bernaldo de Quirós

Fdo.: …… Fecha: ……/ ……/ ……

Autorizada la entrega del proyecto cuya información no es de carácter confidencial

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Ángela Ribeiro Seijas

Fdo.: …… Fecha: ……/ ……/ ……

Vº Bº del Coordinador de Proyectos

Ángela Ribeiro Seijas

Fdo.: …… Fecha: ……/ ……/ ……

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

INGENIERO ELECTROMECÁNICO

Puesta a punto de un vehículo todoterreno para la navegación autónoma en la inspección de cultivos

Autor: Ignacio Olazabal Bernaldo de Quirós
Directora: Ángela Ribeiro Seijas

Madrid

Junio 2015

PUESTA A PUNTO DE UN VEHÍCULO TODOTERRENO PARA LA NAVEGACIÓN AUTÓNOMA EN LA INSPECCIÓN DE CULTIVOS

Autor: Olazabal Bernaldo de Quirós, Ignacio
Directora: Ribeiro Seijas, Ángela
Entidad colaboradora: Centro de Automática y Robótica - (CSIC-UPM))

RESUMEN DEL PROYECTO

Introducción

La agricultura, labranza o cultivo de la tierra [1], ha sido, es y será una actividad económica elemental en cualquier sociedad porque proporciona, tanto a seres humanos como a la ganadería, gran parte del alimento que necesitan para subsistir.

Uno de los principales retos de la agricultura en la actualidad es la continua mejora de sus sistemas de producción. Es más, según las predicciones de expertos, la producción agrícola mundial debería doblarse para el año 2050 por el aumento de la población mundial y la demanda de materias primas obtenidas de la agricultura [2]. La forma en la que se ha buscado aumentar la productividad de los campos es utilizar grandes extensiones de terrenos para un mismo cultivo aplicando un tratamiento uniforme en todo el cultivo. Esta manera de organizar los cultivos plantea, entre otras cosas, la necesidad de utilizar grandes dosis de agroquímicos aplicados de forma uniforme para garantizar un control efectivo de plagas y enfermedades.

Por un lado, los efectos de las plagas y enfermedades en los cultivos son devastadores llegando, en algunos casos, a impedir aprovechamiento alguno de la cosecha. Por otro lado, el tratamiento uniforme sobre todo el terreno conlleva la aplicación de producto en zonas que no lo necesitan para garantizar el adecuado tratamiento de zonas que sí lo necesitan.

Buscando gestionar el cultivo teniendo en cuenta la variabilidad del mismo, aparece el concepto de agricultura de precisión. El tratamiento de un cultivo atendiendo a los preceptos establecidos por la agricultura de precisión requiere conocer previamente el estado del cultivo y contar con unos mapas de distribución de infestaciones (malas hierbas) y demás parámetros que afectan al crecimiento del cultivo. El proceso por el cual se obtiene y procesa esta información se conoce como inspección y es una tarea determinante en el control de plagas y enfermedades para cualquier tipo de cultivo. En la actualidad la inspección de un cultivo en los momentos clave la realizan operarios, aunque la automatización de esta tarea para que se realice con un vehículo autónomo puede conducir, en un futuro, a una inspección más rápida, barata y efectiva.

Teniendo en cuenta esto último, el objetivo de este proyecto se puede resumir en pocas palabras como la puesta a punto de un vehículo para que navegue de modo autónomo realizando la inspección del cultivo. El vehículo utilizado es un cuatriciclo (quad) que se ha elegido por ser el vehículo que se utiliza habitualmente en la inspección de las explotaciones agrícolas. Asimismo será un requisito del sistema desarrollado que éste pueda integrarse en distintos modelos de quad.

Metodología

Tomando como punto de partida los sistemas que se han desarrollado hasta el momento para el guiado de vehículos en cultivos y en exteriores se procede al diseño de la arquitectura del sistema, entorno a la cual se va a organizar el presente proyecto.

La función de los sistemas que se han instalado (ver Figura 1) es permitir el control de la velocidad y la dirección del quad. El primer paso para definir el comportamiento de un vehículo es determinar la dirección y velocidad que tiene que seguir. En este proyecto esta información se envía mediante un sistema teleoperado que envía los parámetros de navegación desde el ordenador del operario al ordenador a bordo del quad vía WiFi. Para poder comprobar si el comportamiento del quad se ajusta a las órdenes de navegación, se incorporan sistemas que miden la velocidad y el giro del eje de dirección. El encargado de enviar la información sobre la velocidad del quad es el receptor GPS tipo RTK (Real Time Kinematics)[1] que combina las señales de los satélites y las correcciones DGPS para determinar, con un error inferior a 0.07 m/s [3] la velocidad a la que se mueve el quad. El giro del eje de dirección se mide mediante una Unidad de Medida Inercial (IMU)[2].

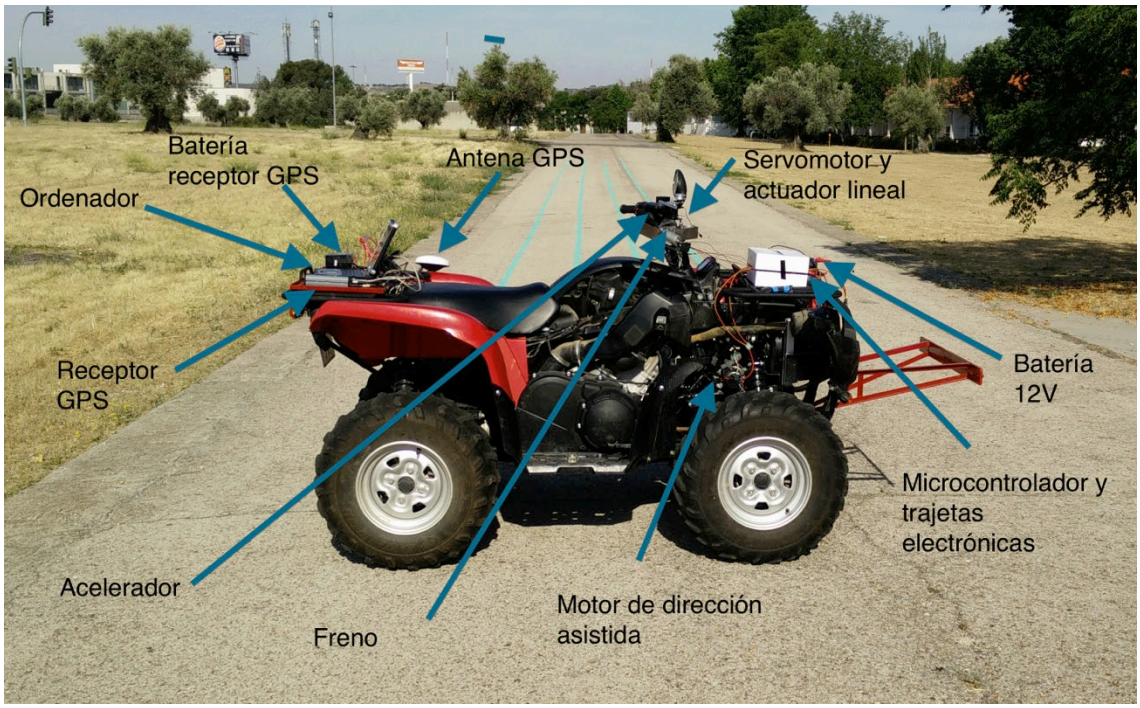


Figura 1. Quad Yamaha Grizzly 700 con los sistemas incorporados

[1] En este proyecto se utilizó el receptor RTK Hemisphere R220. Se puede encontrar más información acerca de este dispositivo y su manual de usuario en la siguiente dirección web http://www.trueheading.se/es/r220

[2] La IMU utilizada en este proyecto es el MPU-6050 cuyas características se pueden consultar en la siguiente dirección web http://store.invensense.com/ProductDetail/MPU6050-InvenSense-Inc/422200/

Una vez se tienen los parámetros de navegación y el valor de la velocidad y la dirección se envía esta información al microcontrolador encargado de la toma de decisiones. Las decisiones que toma el microcontrolador están programadas mediante controles borrosos, cuyo uso está justificado en el conocimiento poco preciso del modelo del vehículo que se quiere controlar. Finalmente, el microcontrolador envía las decisiones de actuación a los sistemas de actuación (ver Figura 2). Estos sistemas se dividen en dos partes: las tarjetas electrónicas de control y los actuadores. Las señales que envía el microcontrolador no tienen la potencia y tensión necesarias para conseguir que funcionen los sistemas de actuación y por ello se ha diseñado y desarrollado una electrónica específica de potencia (tarjetas) que adapta las señales del microcontrolador a las características específicas de cada actuador.

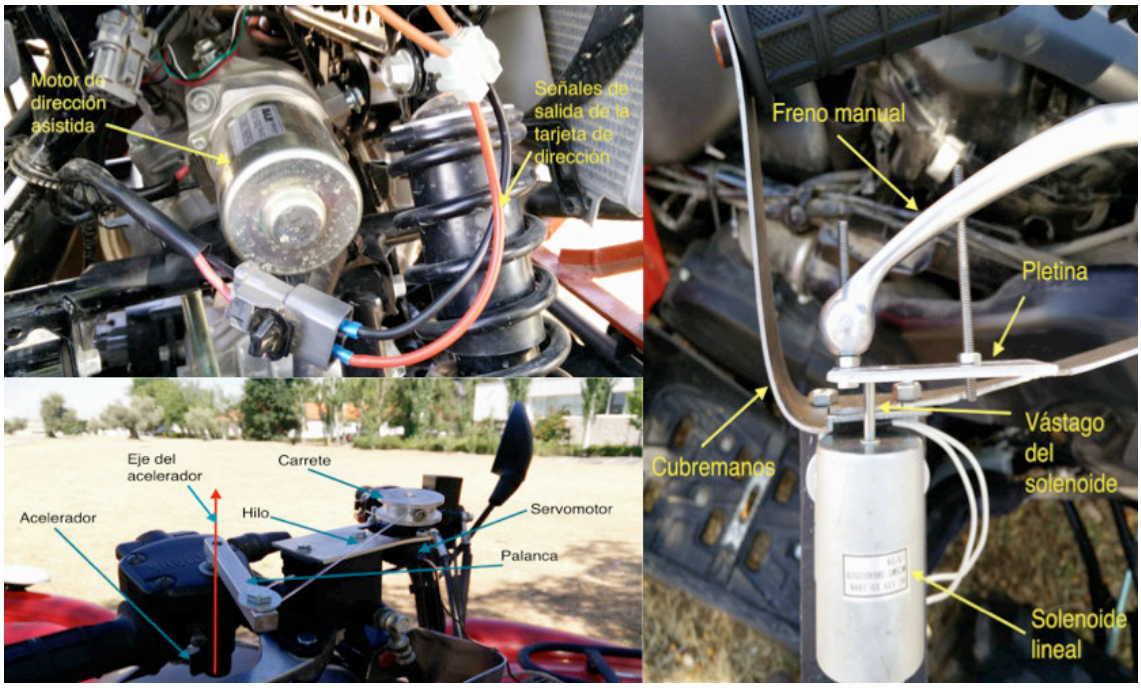


Figura 2. Sistemas de actuación

Resultados

Durante el desarrollo del proyecto se han realizado numerosas pruebas de los distintos bloques del sistema y algunos resultados de estas pruebas se detallan a continuación. En primer lugar, se consiguió enviar los parámetros de navegación vía WiFi desde un ordenador portátil al ordenador a bordo del quad y desde éste al microcontrolador siempre y cuando no hubiese una distancia entre los ordenadores superior a 30 metros (limitación impuesta por la WiFi utilizada). En el momento en que la distancia entre ambos ordenadores era superior a 30 metros el ordenador desde el cual se enviaban los datos perdía la conexión a la red WiFi creada por el ordenador a bordo del quad.

En segundo lugar, se estudiaron tres sistemas para medir el giro del eje de dirección: la brújula HMC855L[3], la IMU MPU 6050 y el receptor GPS que se utiliza para medir la velocidad. Como resultado se obtuvo que la IMU era el mejor dispositivo para medir la orientación del eje ya que tenía un error mucho menor que el suministrado por la brújula

[3] Se puede consultar la hoja de características de esta brújula en la dirección web http://docslide.us/documents/hmc5883l-3-axis-digital-compass-ic.html

y una velocidad de respuesta superior a la del receptor GPS-RTK (20Hz). También se comprobó la precisión de la medición de la velocidad con el receptor GPS y coincidía con la velocidad mostrada en el velocímetro digital del quad.

Con los sistemas de medición instalados se probó y mejoró la respuesta del control y actuación sobre la velocidad. El objetivo es que el vehículo se mueva a 8 km/h para que pueda realizar las tareas de inspección. En la **Figura 3** se observa como se ha conseguido que esta velocidad sea bastante estable en el quad. También se probó el comportamiento del sistema de control de dirección. En este caso las pruebas consistieron en introducir un ángulo de referencia y dejar que el quad se orientase. Cuando ya estaba orientado se cambiaba manualmente la orientación del quad para que volviera a orientarse respecto al ángulo de referencia. En la **Figura 4** se separan las etapas en las que el quad se orienta siguiendo el ángulo de referencia (I,III,V,VII) y las etapas en las que se cambió manualmente su orientación (II,IV,VI).

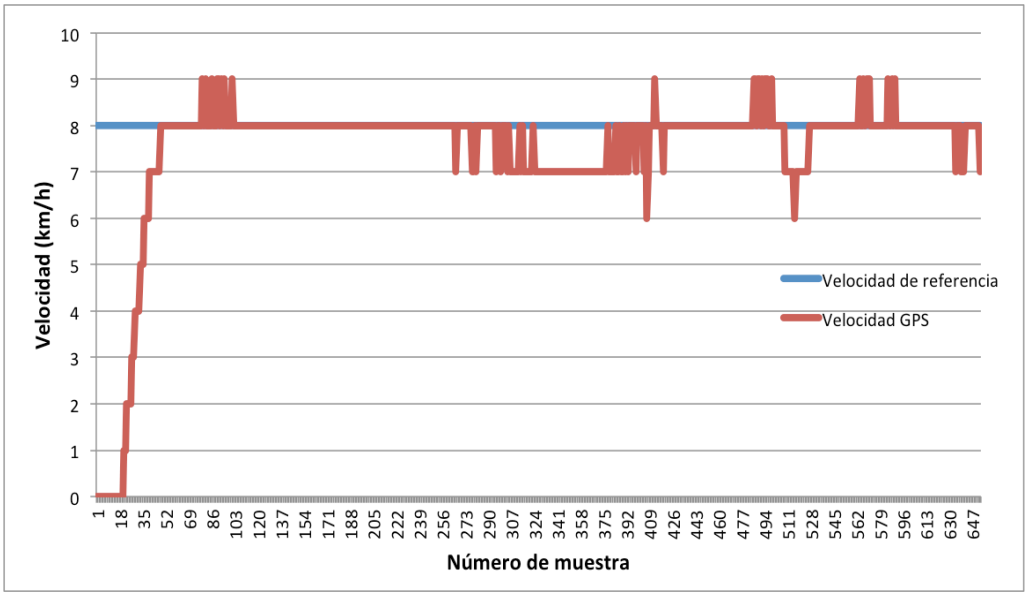


Figura 3. Seguimiento de la velocidad de referencia

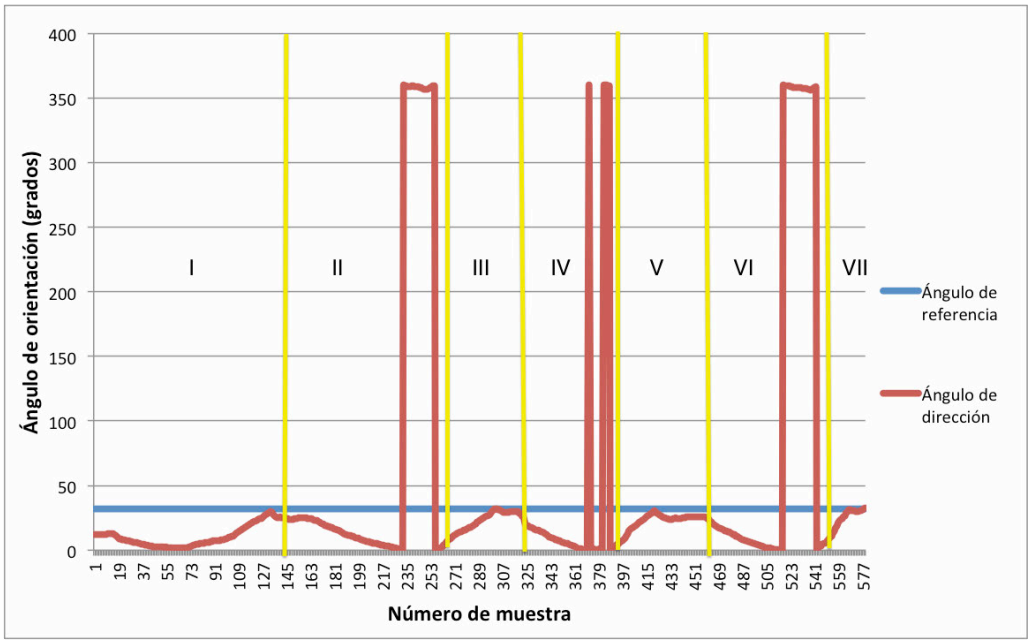


Figura 4. Seguimiento del ángulo de referencia introduciendo variaciones

Además, el sistema de frenado consiste en la utilización de un solenoide lineal para simular la fuerza que ejercería una persona sobre el freno manual. Una vez instalado se probó el sistema de control del freno resultando éste insuficiente para llevar a cabo un frenado brusco El problema es que al actuador lineal (solenoide lineal) instalado le faltaba un poco de fuerza en la posición de frenado rápido, concretamente, necesita ejercer una fuerza 0.5 kg superior.

Finalmente, al integrar todos los bloques en un mismo programa se comprobó que la memoria flash del microcontrolador utilizado (ATmega 328 programado en un entorno Arduino) era inferior que el tamaño del programa completo de control y comunicaciones. Para solucionar este problema se puede utilizar un sensor cuyas librerías de control en Arduino ocupen menos lugar en la memoria flash del microcontrolador que las de la IMU utilizada como puede ser un encoder o un potenciómetro. También se puede solucionar utilizando la placa Arduino DUE que tiene una memoria Flash 6 veces mayor.

Conclusiones

Respondiendo a la necesidad de contar con un quad que pueda llevar a cabo la inspección de cultivos se han desarrollado e integrado sistemas que permiten el control de velocidad y dirección de un quad y que pueden ser instalados en distintos modelos, siempre y cuando cuenten con dirección asistida eléctrica.

Aunque se ha conseguido que el quad siga una velocidad de referencia de 8 km/h y un ángulo de referencia aún hay margen de mejora. En primer lugar hay que solucionar las limitaciones de fuerza del actuador lineal y el tamaño de la memoria flash del microcontrolador utilizado. También sería necesario mejorar el sistema de teleoperado para aumentar el rango de funcionamiento utilizando un repetidor de la señal WiFi.

Referencias

[1] Real Academia Española. *Diccionario de la lengua española (22ª ed*.) Madrid, España; 2001

[2] Reid, J. *The impact of mechanization on agriculture.* Ntl. Academy Eng. Bridge, Issue Agriculture Informat. Techonology, pp 22-29

[3] Kubo, N., & Dihan, *C. Performance Evaluation of RTK-GNSS with Existing Sensors in Dense Urban Areas.* 2014

SETTING UP AN ALL-TERRAIN VEHICLE FOR AUTONOMOUS NAVIGATION ON CROP INSPECTION

Author: Olazabal Bernaldo de Quirós, Ignacio
Director: Ribeiro Seijas, Ángela
Collaborating organization: Centro de Automática y Robótica - (CSIC-UPM)

ABSTRACT

Introduction

Agriculture, the tilling of land [1], has been, is and will be an elementary economic activity in any society because it provides both humans and livestock much of the food they need to subsist.

One of the main challenges facing agriculture today is the continuous improvement of the production systems. Moreover, according to expert predictions, global agricultural production should doubled by 2050 due to the rising world population and demand for raw materials obtained from agriculture [2]. The way it has sought to increase the productivity of the fields is using large areas of land for a single crop and applying a uniform treatment throughout the crop. This way of organizing the crops raises, among other things, the need for large doses of agrochemicals uniformly applied to ensure effective control of pests and diseases.

On the one hand, the effects of pests and crop diseases can be so devastating that, in some cases, they preclude any use of the crop. On the other hand, uniform treatment throughout the land involves applying products in areas where it is not needed to ensure the proper treatment of those areas that need it.

Seeking to manage the crop taking into account its variability arises what is known as precision agriculture. The treatment of the land following the precepts established by precision agriculture requires prior knowledge of the state of the crop and maps with the distribution of infestations and other parameters that affect the growth of the crop. The process by which this information is obtained and processed is called inspection and is crucial to control infestations and diseases for all kinds of crop. Nowadays, the inspection in key moments is performed by an operator, but automating this task so that it can done by and autonomous car can lead, in the future, a faster, cheaper and effective inspection.

Given the latter, the aim of this project can summarized briefly as the development of a vehicle to navigate autonomously performing the inspection of crops. The vehicle that is used is an ATV being it a vehicle that is commonly used in the inspection of farms. Moreover, the developed system has to be developed in a way that in can be integrated in other ATV models.

Methodology

Taking as starting point the systems that have been developed so far for guiding vehicles in outdoor and crops we proceed to the design of architecture of the system that will be used to organize this project.

The role of systems that have been installed (see Figure 1) is to allow control of the speed and direction of the quad. The first step to define the behaviour of a vehicle is to determine the direction and speed that is wanted for the navigation. In this project, this information is sent through a system that sends wirelessly navigation parameters from the operator's computer to the computer aboard the quad via WiFi. For the checking of the ATV's behaviour conforms to the parameters of navigation we have incorporated systems that measure the speed and rotation of the steering shaft. The GPS receiver is responsible for sending information on the ATV's speed. This GPS receiver uses the RTK (Real Time Kinematics)[1] technology, based on the satellite signals that reach the antenna and DGPS corrections obtained by the computer, to calculate the speed at which the ATV moves with an error under 0.07 m/s [3]. Also, the rotation of the steering shaft is measured by Inertial Measurement Unit (IMU)[2].

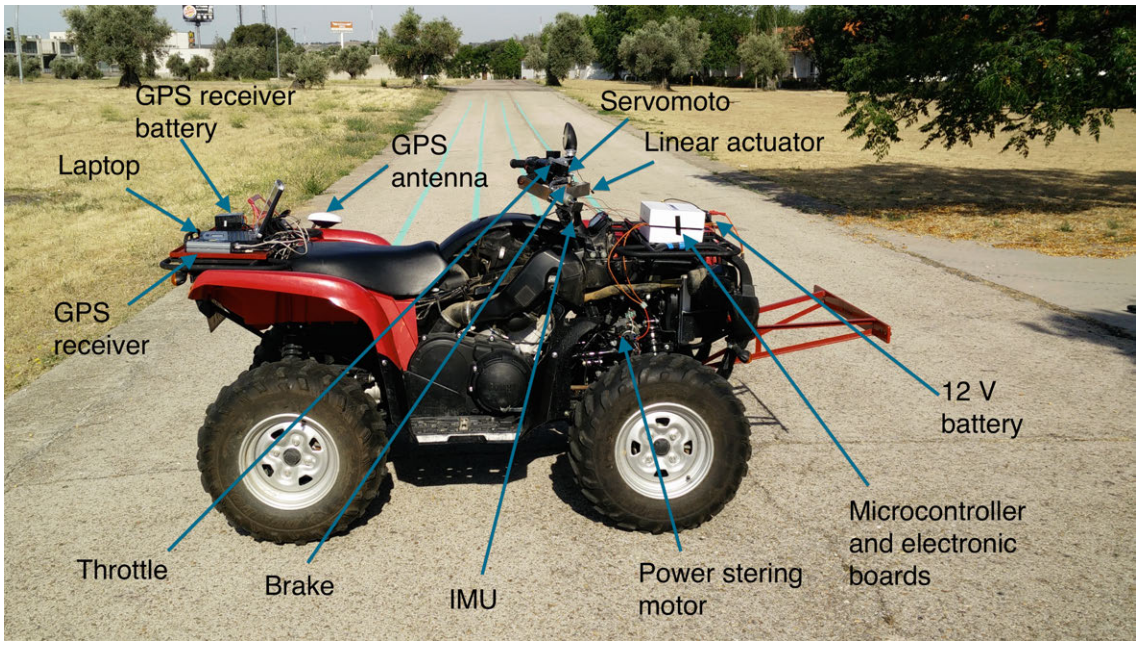


Figure 1. Yamaha Grizly 700 with the systems installed

Once the navigation parameters and the value of the speed and direction information are computed they are sent to the microcontroller responsible for decision-making. The decisions taken by the microcontroller are programmed by fuzzy controls, whose use is justified in the imprecise knowledge of the plant to be controlled. Finally, the

[1] In this project the RTK Hemispere R220 was used. More infomormation about this device and the user manual can be found in the following website http://www.trueheading.se/es/r220

[2] The IMU used in this project is the MPU-6050, More information abour this deveice can be found in the following website http://store.invensense.com/ProductDetail/MPU6050-InvenSense-Inc/422200/

microcontroller sends the decisions of performance to the actuation systems (see Figure 2). These systems are divided into two parts: electronic control cards and actuators. The signals sent by the microcontroller do not have the power or voltage required for operating the actuation systems and, therefore, an specific power electronic (cards) has been developed to adapt the signals sent by the microcontroller to the specific characteristics of each actuator.

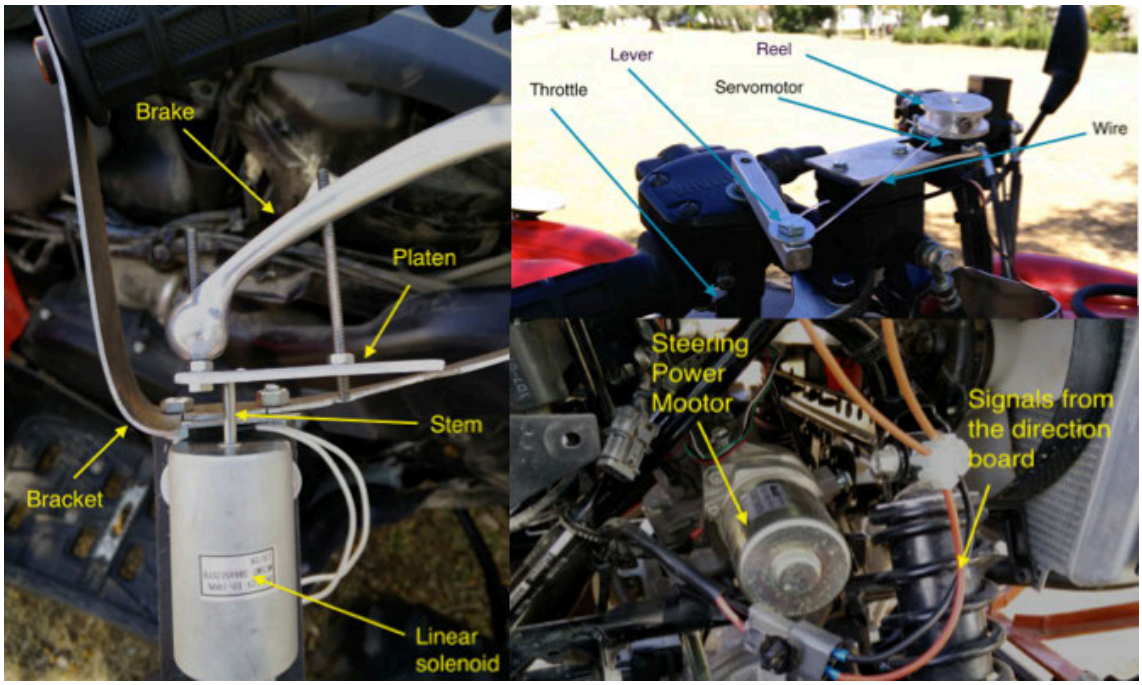


Figure 2. Actuation systems

Results

During the project there have been numerous tests of the blocks of the system and the results of these tests are listed below. First, it was possible to send navigation parameters via WiFi from a laptop to the computer aboard the ATV and from here to the microcontroller in arrange under 30m (limitation imposed by the used WiFi) between the computers. By the time the distance between the computers was bigger than 30m the computer from where the information was sent was unable to connect to the WiFi network created by the computer on board the ATV.

Secondly, three systems for measuring the rotation of the steering shaft were tested: the HMC855L compass[3], MPU 6050 IMU and the GPS receiver used to measure speed. The test results of these three systems is that the best measuring axis orientation was the IMU since it had a much smaller compass error and a faster response than the one of the GPS-RTK (20Hz) receiver. The accuracy of the velocity measurement with the GPS receiver was also tested and matched the speed shown on the speedometer of the ATV.

With the measurement systems installed the speed control was tested and improved. The vehicle is meant to move at 8 km/h for the inspection to be done and Figure 3 shows how this speed is achieved and remains fairly stable in the quad. The behaviour of the steering control system was also tested. In this case the experiment was to introduce a

[3] The datasheet of thsi device can be found in this website http://docslide.us/documents/hmc5883l-3-axis-digital-compass-ic.html

reference angle and let the quad orientate itself. Once it was correctly orientated the direction was changed manually and the response of the control was computed. In Figure 4 the stages in which the quad is oriented along the reference angle (I, III, V, VII) and the stages in which its orientation is changed manually (II, IV, VI).

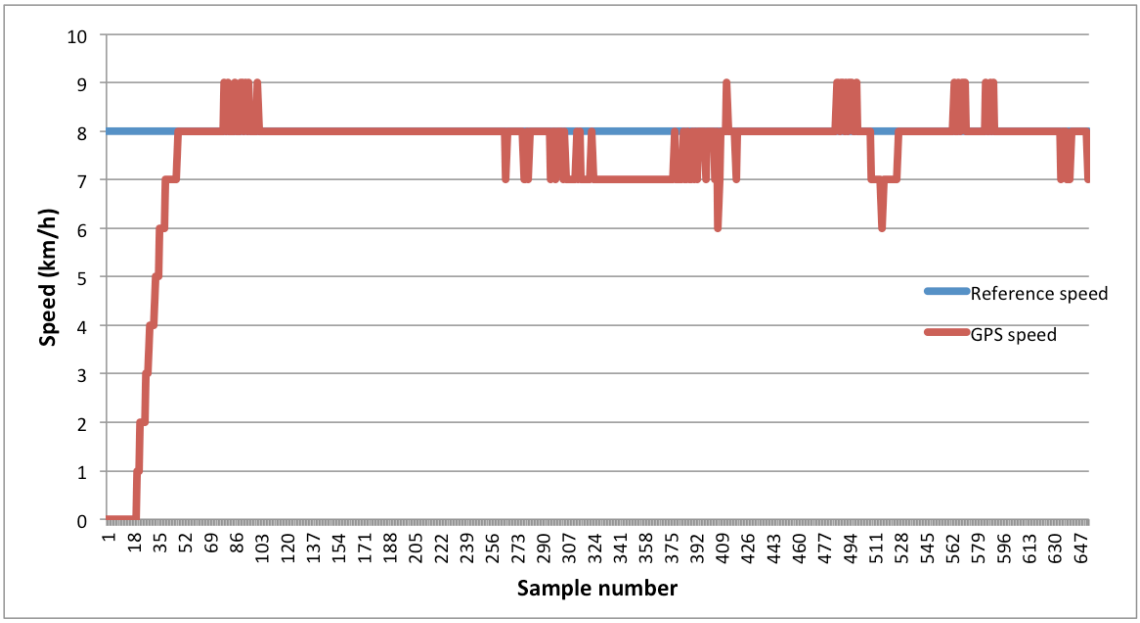


Figure 3. Following of the reference speed

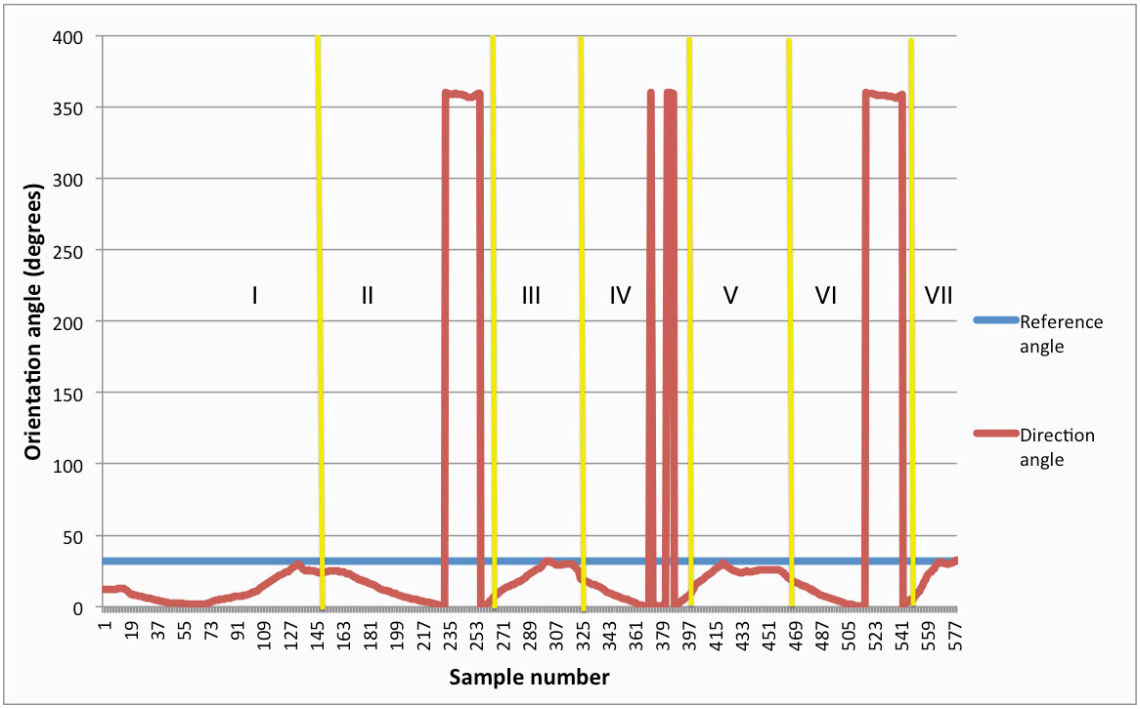


Figure 4 Following of the reference angle with introduced variations

In addition, the brake control system using a lineal solenoid to simulate the force applied by a human to brake was also tested resulting that it is not capable of performing a fast braking. The problem is that the linear actuator (lineal solenoid)

installed lacked a bit of strength in the position of fast braking, specifically, needs to exert an extra 0.5 kg force.

Finally, by integrating all the blocks in the same program it was found that the flash memory of the microcontroller used (ATmega 328 programmed in an Arduino environment) was not big enough to store the entire control and communications program. This problem can be solved using a different direction sensor whose control libraries use less space in the microcontroller memory. Another solution could be using the Arduino DUE board whose flash memory is six times bigger than the one of the Arduino UNO.

Conclusions

Responding to the need for an ATV that can carry out the inspection of crops in this project the systems that enable the autonomous ATV navigation have been developed and integrated allowing speed control and can be installed on different models, provided that have EPS (Electric Power Steering).

Although the main objectives of following a reference speed of 8 km/h and a reference angle have been achieved there is still room for improvement. First the limitations of linear actuator force and the size of the flash memory of the microcontroller have to be solved. It would also be necessary to improve the wireless communication system to increase the distance operating range by using a WiFi signal repeater.

References

[1] Real Academia Española. *Diccionario de la lengua española (22ª ed*.) Madrid, España; 2001

[2] Reid, J. *The impact of mechanization on agriculture.* Ntl. Academy Eng. Bridge, Issue Agriculture Informat. Techonology, pp 22-29

[3] Kubo, N., & Dihan, *C. Performance Evaluation of RTK-GNSS with Existing Sensors in Dense Urban Areas.* 2014

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mi directora de proyecto, Ángela, por su dedicación durante este tiempo y por permitirme desarrollar este proyecto en el Centro de Automática y Robótica del CSIC-UPM. También quiero agradecer el trato recibido por el personal del centro, especialmente a Chema, Dioni, Damián y Jesús por toda su ayuda y paciencia.

También me gustaría agradecer el apoyo y la formación recibida en la Universidad Pontificia de Comillas (ICAI) durante estos cuatro años. En ICAI he tenido la oportunidad de tener profesores, compañeros y amigos que han hecho que me sienta como en casa.

No puedo dejar de agradecer a mis padres y a mis cinco hermanos porque nunca han dejado de apoyarme incondicionalmente. Me gustaría dar las gracias también al resto de mi familia, abuelas, tíos y primos. Gracias también a Pilar, por soportar a un futuro ingeniero.

Por último, gracias a todos aquellos que forman parte de mi vida, especialmente a mis amigos más cercanos.

Índice de la memoria

Parte I Memoria ***3***

Capítulo 1 Introducción ***5***

1.1 Estado del arte **7**

1.1.1 Sistemas de percepción y posicionamiento 8

1.1.2 Toma de decisiones 10

1.1.3 Sistemas de actuación 13

1.1.4 Autotrac Universal 200 15

1.2 Motivación del proyecto **16**

1.3 Objetivos **17**

1.4 Recursos / herramientas empleadas **17**

Capítulo 2 Arquitectura del sistema ***19***

2.1 Introducción **19**

2.2 Teleoperado **21**

2.3 Receptor GPS **22**

2.4 IMU **25**

2.5 Ordenadores de a bordo y del operario **27**

2.6 Sistemas de actuación **28**

2.6.1 Sistema de actuación sobre el acelerador 29

2.6.2 Sistema de actuación sobre el freno 31

2.6.3 Sistema de actuación sobre la dirección 34

2.7 Microcontrolador – Arduino UNO **38**

2.7.1 Control borroso 40

2.7.2 Control borroso de velocidad 40

2.7.3 Control borroso de dirección 45

Capítulo 3 Resultados/Experimentos ***53***

3.1 Resultados del control de velocidad **53**

3.2 Resultados del control de dirección **58**

3.3 Resultados del freno 60

Capítulo 4 Conclusiones 61

Capítulo 5 Futuros desarrollos 63

Bibliografía 65

Parte II Planos 67

Parte III Estudio económico 73

Capítulo 1 Estudio económico 75

Parte IV Presupuesto 77

Capítulo 1 Mediciones 79

1.1 Componentes principales 79

1.2 equipo y herramientas 80

1.3 Software 80

1.4 Mano de obra directa 81

Capítulo 2 Precio unitarios 82

2.1 Componentes principales 82

2.2 Equipo y herramientas 83

2.3 Software 83

2.4 Mano de obra directa 84

Capítulo 3 Sumas parciales 85

3.1 Componentes principales 85

3.2 Equipo y herramientas 86

3.3 Software 87

3.4 Mano de obra directa 88

Capítulo 4 Presupuesto general 89

Parte V Manual de usuario 91

Capítulo 1 Conexiones 93

1.1 Introducción 93

1.2 Alimentación de los componentes 93

1.3 Conexiones entre los componentes 94

1.3.1 Conexiones del ordenador 94

1.3.2 Conexiones de la tarjeta arduino y las tarjetas 95

1.3.3 Conexión de la antena 98

Capítulo 2 Arranque del sistema 99

Capítulo 3 Funcionamiento y obtención de los datos de navegación 103

Parte VI Datasheets 105

Índice de figuras

Figura 1. Secuencia de navegación 7
Figura 2. Esquema de sistema GPS RTK de John Deere 9
Figura 3. Esquema del control PID 11
Figura 4. Ejemplo de funciones de pertenencia en conjuntos borrosos 12
Figura 5. Matlab Fuzzy Logic Toolbox 13
Figura 6. Quad autónomo de la Universidad de Carolina del Norte 14
Figura 7. Arquitectura del sistema 20
Figura 8. Quad Yamaha Grizzly 700 con los sistemas incorporados 21
Figura 9. Interfaz de control teleoperado 22
Figura 10. Conexiones del receptor GPS 23
Figura 11. Receptor GPS Hemisphere R220 24
Figura 12. Antena GPS 25
Figura 13. Ángulos de giro 25
Figura 14. IMU MPU-6050 26
Figura 15. Localización de la IMU en el quad 27
Figura 16. Comunicación entre ordenadores y microcontrolador 28
Figura 17. Localización de los sistemas de actuación sobre el freno y el acelerador 29
Figura 18. Esquema de la tarjeta de control del acelerador 30
Figura 19. Mecanismo de giro del acelerador 31
Figura 20. Esquema del sistema de actuación sobre el freno 32
Figura 21. Secuencia de frenado: a) freno desactivado y b) freno activado. 33
Figura 22. Mecanismo de actuación sobre el freno 33

Figura 23. Motor de dirección asistida 36
Figura 24. Esquema del sistema de actuación sobre la dirección 37
Figura 25. Esquema de la tarjeta de dirección 38
Figura 26. Esquema del control borroso de velocidad 41
Figura 27. Funciones de pertenencia de los conjuntos del error de velocidad 42
Figura 28. Funciones de pertenencia de los conjuntos de la variación del error de velocidad 43
Figura 29. Funciones de pertenencia de la variación del ángulo del servomotor . 44
Figura 30. Esquema del control borroso de dirección 46
Figura 31. Ruta seguida dentro del Centro de Automática y Robótica. Imagen de Google Earth 47
Figura 32. Comparación del ángulo medido por los sensores en la ruta 48
Figura 33. Funciones de pertenencia del error en el control de dirección 49
Figura 34. Funciones de pertenencia de la variación del error en el control de dirección 50
Figura 35. Señal PWM escalonada 50
Figura 36. Variación del ángulo girado por el eje de dirección 51
Figura 37. Funciones de pertenencia de la cantidad de giro 52
Figura 38. Imagen de la pista sobre la que se han realizado las pruebas 53
Figura 39. Seguimiento de velocidad con ángulo limitado a 15 54
Figura 40. Variables de control con ángulo limitado a 15 55
Figura 41 Seguimiento de velocidad con ángulo limitado a 13 56
Figura 42. Variables de control con ángulo limitado a 13 56
Figura 43. Seguimiento de velocidad con ángulo limitado a 14 e incremento pequeño 1 57
Figura 44. Variables de control con ángulo limitado a 14 e incremento pequeño 1 57

Figura 45.Seguimiento de la velocidad de referencia enviada desde el ordenador del operario vía WiFi 58
Figura 46. Seguimiento de un ángulo de referencia 160º menor 59
Figura 47. Seguimiento de un ángulo de referencia frente a grandes perturbaciones 60
Figura 48. Conexiones de la tarjeta del acelerador 96
Figura 49. Conexiones de la tarjeta de dirección 97
Figura 50. Conexiones de la tarjeta de freno 98
Figura 51. Configuración de la señal DGPS 99
Figura 52. Configuración de la transmisión de las correcciones DGPS al receptor GPS 100
Figura 53. Comandos para la creación de una red WiFi 100
Figura 54. Configuración de la dirección IP del servidor 101
Figura 55. Configuración de la dirección IP del ordenador que envía los datos desde la interfaz 101
Figura 56. Ejemplo de la interfaz 103
Figura 57. Módulo SD conectado a la Arduino UNO 104

Índice de tablas

Tabla 1. Fuerzas aplicadas en el manillar para girar el quad 34
Tabla 2. Condiciones de trabajo del motor de dirección asistida 36
Tabla 3. Características de la placa Arduino UNO 39
Tabla 4. Rangos de los conjuntos del error de velocidad 42
Tabla 5. Rangos de los conjuntos de la variación del error de velocidad 43
Tabla 6. Rangos de los conjuntos borrosos de la variación del ángulo del servomotor 44
Tabla 7. Reglas del control de velocidad 45
Tabla 8. Rangos de los conjuntos del error de dirección 49
Tabla 9. Rangos de los conjuntos de la variación del error en el control de dirección 49
Tabla 10. Rangos de los conjuntos borrosos de la salida del control de dirección 51
Tabla 11. Reglas del control de dirección 52
Tabla 12. Relación de componentes 80
Tabla 13. Relación de equipos y herramientas 80
Tabla 14. Relación de herramientas de software 81
Tabla 15. Relación de horas de mano de obra 81
Tabla 16. Precio unitario de componentes principales 83
Tabla 17. Precio unitario del equipo y herramientas 83
Tabla 18. Precio unitario del software 84
Tabla 19. Coste unitario de mano de obra 84
Tabla 20. Coste total de componentes principales 86
Tabla 21. Coste toal del equipo y herramientas 87
Tabla 22. Coste total del software 87

Tabla 23. Coste total de mano de obra 88

Tabla 24. Presupuesto general 89

Parte I MEMORIA

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

La agricultura, labranza o cultivo de la tierra [1], ha sido, es y será una actividad económica elemental en cualquier sociedad. La agricultura proporciona, tanto a los seres humanos como a la mayoría de la ganadería, gran parte del alimento que necesitan para subsistir.

Sin embargo, la forma de trabajar la tierra y el mantenimiento de los cultivos ha ido cambiando a lo largo de la historia. Hasta después de la Edad Media los cultivos se organizaban en pequeñas parcelas a cargo de campesinos, que buscaban satisfacer sus necesidades con gran variedad de cultivos (y poder pagar el tributo al señor feudal). En la actualidad se ha pasado a un esquema extensivo de agricultura más homogéneo, en el que se pueden encontrar grandes superficies de terreno dedicadas a un único cultivo. Aunque en cuanto a labores, siembra y tratamiento este tipo de organización facilita la producción a gran escala, tiene el problema de que la aparición de una enfermedad o plaga en el cultivo puede acabar con la productividad de toda la extensión de terreno que se ha dedicado a dicho cultivo. Por ello, en la agricultura extensiva es determinante la aplicación de herbicidas y otros productos que prevengan y luchen contra las enfermedades o plagas que puedan aparecer. Sin embargo, estos productos se aplican de manera uniforme en toda la extensión del cultivo pudiendo dejar zonas necesitadas de una dosis mayor expuestas a riesgos y aplicando exceso de producto en zonas que no lo necesitan.

Buscando satisfacer las necesidades específicas de las distintas superficies surge lo que se conoce como agricultura de precisión. La agricultura de precisión agrupa un conjunto de prácticas cuyo objetivo es la gestión del cultivo teniendo en cuenta la variabilidad del mismo lo que puede traducirse en una mayor rentabilidad económica y medioambiental [2]. En el caso concreto de los

tratamientos, busca aplicar sobre cada unidad de terreno la dosis apropiada, en el momento adecuado, con el objetivo de alcanzar un tratamiento eficaz del cultivo.

Para poder aplicar el tratamiento adecuado a cada zona del cultivo es necesario conocer el estado en el que se encuentran las distintas partes del mismo. Para ello es necesario recopilar información sobre el crecimiento del cultivo, la aparición de malas hierbas, enfermedades y plagas. Este proceso de obtención de información que ayuda a conocer el estado del cultivo se conoce como inspección. Es muy importante que la labor de inspección se realice de manera rápida y precisa para poder responder eficientemente a las necesidades de la tierra y los cultivos. A la labor de inspección hay que añadirle la tarea de realizar un mapa de distribución de malas hierbas, infestaciones y demás parámetros que afectan al crecimiento y desarrollo del cultivo para poder llevar a cabo un tratamiento eficiente.

Aunque el ser humano es capaz, con la ayuda de la tecnología, de procesar la información y construir los mapas de distribución, es más eficiente y económico que la inspección y posterior tratamiento de la información se haga de manera automática. Por tanto es necesario contar con un sistema que capture imágenes del cultivo, las procese y extraiga la información de las imágenes y, finalmente, localice en un mapa las zonas que precisan algún tipo de tratamiento. Además, conviene que, una vez se tiene organizada la información, las labores sobre el terreno se lleven a cabo de la forma más precisa posible mediante sistemas que puedan proporcionar un rendimiento mayor.

La automatización del proceso de inspección se ha completado parcialmente en distintos proyectos aunque no en su totalidad. Por ello se busca desarrollar un sistema que automatice completamente el proceso y el primer paso para desarrollar el mismo es la puesta a punto para la navegación autónoma de un vehículo disponible en la mayoría de explotaciones agrícolas, es decir de un quad. Esta puesta a punto permitirá que el quad se siga utilizando manualmente pero pudiendo navegar de forma autónoma, lo que evita tener que adquirir un vehículo nuevo con el coste que esto conlleva.

1.1 ESTADO DEL ARTE

Las predicciones de crecimiento de la población mundial y la demanda de alimento y materias primas obtenidas de la agricultura para 2050 establecen que la producción agrícola mundial debería doblarse [3]. Para poder satisfacer la creciente demanda se han propuesto muchas soluciones que buscan automatizar las distintas partes de los procesos en el sector agrícola. Un proceso muy importante y que se ha logrado automatizar parcialmente es la navegación en exteriores.

La ayuda a la navegación en exteriores se viene desarrollando desde la década de 1980 [8] y ha ido madurando a medida que han ido evolucionando las tecnologías relacionadas. Ejemplo de tecnologías relacionadas son los sistemas de posicionamiento que permiten conocer de forma más o menos precisa la posición de un receptor sobre la tierra y los sistemas de actuación que permiten la ejecución de órdenes.

Para lograr que un vehículo se mueva según unas reglas o siga un comportamiento determinado sin intervención humana es necesario que sea capaz de determinar el estado en el que se encuentra (posición, dirección, velocidad, etc.). Una vez se conoce el estado se puede comprobar si éste es el deseado o si hace falta ejecutar alguna acción, es decir, es necesario que haya un sistema encargado de decidir lo que el vehículo tiene que hacer para alcanzar el estado deseado y dar las órdenes pertinentes. En otras palabras, en la navegación se sigue, tal como muestra la Figura 1, un proceso con tres etapas a automatizar: la percepción, la toma de decisiones y la actuación.

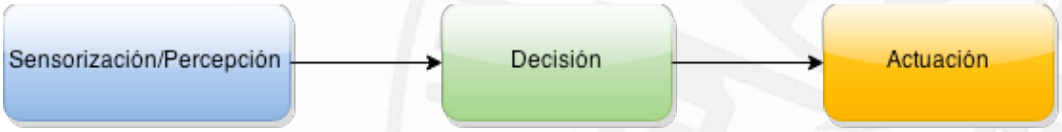


Figura 1. Secuencia de navegación

1.1.1 SISTEMAS DE PERCEPCIÓN Y POSICIONAMIENTO

Como ya se ha comentado anteriormente, lo primero que tiene que hacer un vehículo autónomo para poder ir de una posición inicial a una posición destino o final es conocer la posición en la que se encuentra en cada momento. La posición del vehículo se puede conocer tanto de forma absoluta (sistemas de posicionamiento global) como de forma relativa a un entorno (por ejemplo a través de odómetros o de sensores como cámaras).

La forma de posicionamiento absoluta más empleada hoy en día es el sistema GPS (Global Positioning System) que utiliza señales enviadas por satélites para conocer la posición de un receptor en Tierra. Los satélites envían información con su identificación, posición e instante en el cual se envía la información y, con la combinación de la información de varios satélites, el receptor es capaz de calcular su posición en 3D y velocidad con una precisión que varía según el sistema GPS utilizado y el tipo de señal. Por ejemplo un equipo convencional que utiliza únicamente las señales de los satélites puede tener una precisión en el posicionamiento de unos 10 metros.

Para corregir errores y aumentar la precisión se ha desarrollado el GPS diferencial o DGPS. Se trata de disponer de una base en una posición conocida que envía señales de corrección generadas a partir de la señal GPS que recibe la propia base y de la posición conocida. Estas correcciones tienen validez para receptores que se encuentren dentro de un rango de 100 km.

Además, el sistema RTK-GPS (Real Time Kinematics) puede dar una precisión inferior al centímetro. En este caso, la antena del receptor tiene que estar dentro de un rango de 10 km de una estación base con la que tiene que comunicarse para obtener las correcciones que permiten una precisión tan alta [5]. En el sector agrícola se utilizan sistemas como el mostrado en la Figura 2 para programar el recorrido de la maquinaria, almacenar la trayectoria que se ha seguido y seguir de modo preciso esta trayectoria en futuras labores.

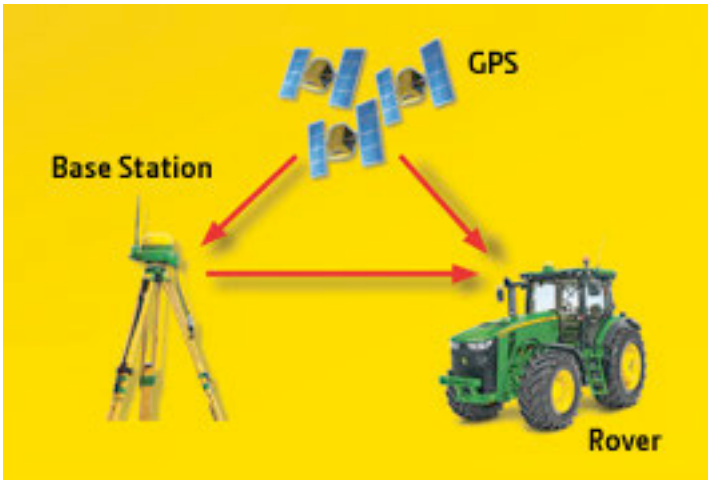


Figura 2. Esquema de sistema GPS RTK de John Deere

Hay trabajos que plantean el guiado utilizando el GPS como único sensor de posición [6] considerando que la información que aportan estos sistemas es suficiente. De esta manera, se puede programar una ruta con las coordenadas de los puntos por los que tiene que pasar el vehículo y corregir la trayectoria en caso de que no siga la ruta planeada.

Sin embargo, el sistema GPS tiene algunos inconvenientes. En primer lugar, para que el sistema funcione correctamente es necesario que al menos 4 satélites estén visibles. Además, si hay obstáculos altos cerca de la antena del receptor las señales de los satélites se reflejarán dando lugar a errores de medida. También pueden influir negativamente las condiciones climatológicas [5].

A pesar de la enorme precisión, estos sistemas no tienen la capacidad de adaptación [8] a los cambios en el entorno que pueden provocar incluso el cambio de la ruta del vehículo para, por ejemplo, evitar un obstáculo. Por tanto, parece interesante la inclusión de una dotación sensorial que permita al vehículo construir una imagen de su entorno. Por ejemplo, mediante el procesamiento de las imágenes tomadas por una cámara a bordo del vehículo es posible detectar elementos de interés para la navegación segura, como pueden ser obstáculos o las líneas de cultivo. Un problema adicional a la navegación autónoma en el caso de un vehículo de inspección es la recogida de información geo-referenciada que

permita generar mapas del estado del cultivo, la distribución de malas hierbas, etc.. Es decir hay que disponer de información que permita situar el punto en el que se ha recogido la información sobre un mapa. En definitiva, si estamos hablando de un sistema autónomo de inspección en el entorno agrícola, parece adecuado que el vehículo disponga de una dotación sensorial que le permita tanto recoger información geo-referenciada del entorno como detectar los elementos de interés necesarios para una navegación autónoma segura

Es más, robots como los desarrollados en proyectos como RHEA(Robot Fleets for Highly Effective Agriculture) utilizan, además del GPS (tipo RTK) y cámaras, IMUs (Inertial Measurement Unit) [6] [3] para conocer, entre otros, los giros efectuados. Por otro lado, *Marcel Bergerman et al*. [8] utilizan encoders para conocer los giros del eje y las ruedas.

1.1.2 TOMA DE DECISIONES

Una vez se conoce la posición de la que se parte y la posición a alcanzar falta definir la trayectoria o recorrido que tiene que seguir el vehículo. La forma de hacerlo en los vehículos que utilizan GPS como único sensor de posición es definiendo una serie de puntos (coordenadas) por los que tiene que pasar el vehículo de modo aproximado antes de llegar a la posición final. Asimismo es conveniente disponer de algún mecanismo de supervisión que permita monitorizar la navegación del vehículo y determinar si se sigue correctamente la trayectoria y en caso de no ser así generar señales que indiquen a los sistemas de actuación las correcciones que tienen que efectuar.

Las señales se pueden generar mediantes sistemas de control de distinta naturaleza cuyo funcionamiento dependerá de los elementos sobre los que actuar y de los objetivos perseguidos. El control industrial cuyo uso está más extendido en la actualidad es el control PID (Proporcional Integral Derivativo) ya que más del 90% de los controles industriales son PID [9]. Este control se divide en tres bloques (ver Figura 3): proporcional, integral y derivativo. El bloque proporcional genera una salida proporcional al error de la señal de entrada mediante un factor

de ganancia. El segundo bloque, el integral, reduce los errores estacionarios mientras que el bloque derivativo mejora el transitorio de la respuesta. Por un lado, este control tiene la ventaja de que hay disponible mucho software que facilita la programación e implantación del mismo. Por otro lado, presenta el inconveniente de que para diseñar el control es necesario tener un modelo preciso de la planta.

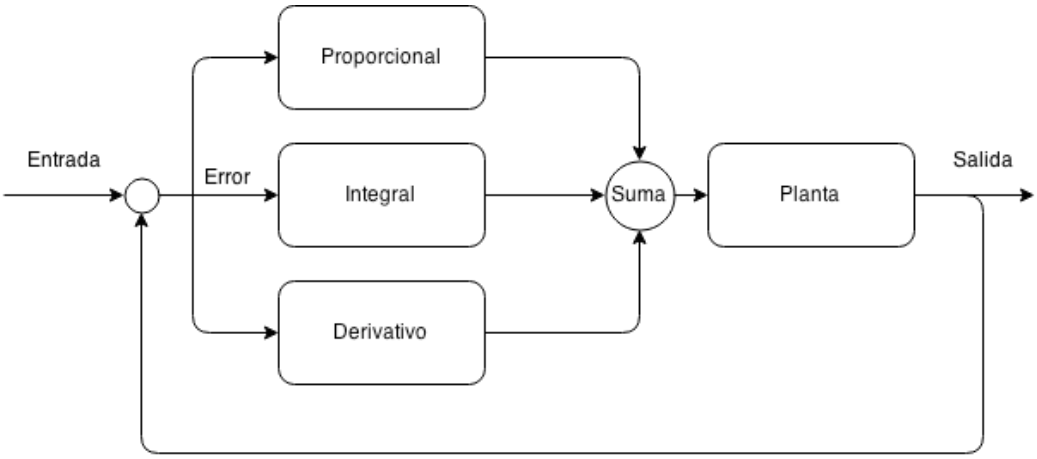


Figura 3. Esquema del control PID

Cuando un sistema es un muy complejo es muy complicado tener un modelo preciso y por tanto controlarlo con un control PID. Una alternativa a este tipo de control es la que se basa en el razonamiento humano. Los elementos claves del razonamiento humano no son precisos sino que son conceptos borrosos cuya pertenencia a una clase no es discreta sino gradual. Este tipo de razonamiento permite resumir la información utilizando sólo la información relevante.

A partir de esta premisa se desarrolla la Teoría de Conjuntos Borrosos [17] cuyas bases formuló L.A. Zadeh en 1965 [9][11] y se basa en el reconocimiento de que determinados conjuntos tienen unos límites poco precisos. Los conjuntos borrosos se caracterizan por una función de pertenencia (ver Figura 4) contenida en un intervalo de valores. La función de pertenencia indica el grado de compatibilidad de la variable (en la Figura 4 la Edad) con el concepto (Maduro) que es el valor lingüístico asociado a un subconjunto borroso.

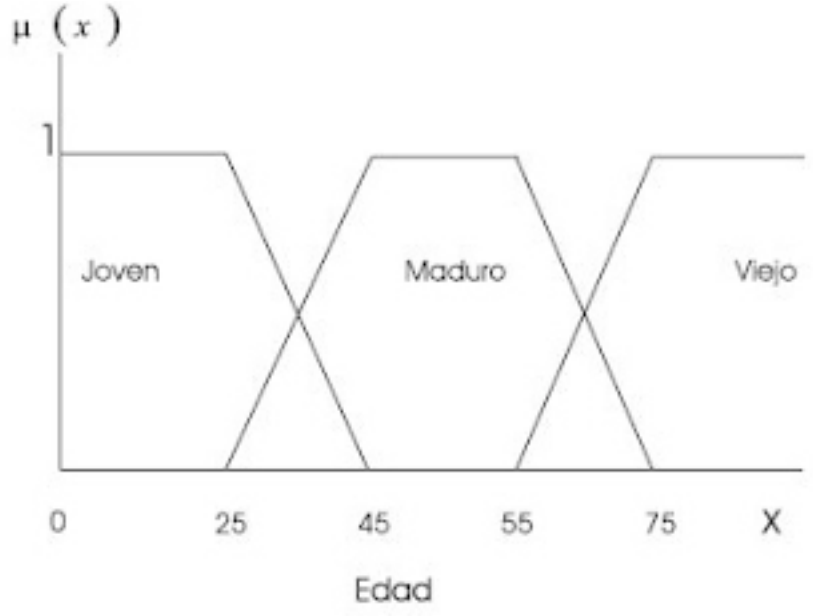


Figura 4. Ejemplo de funciones de pertenencia en conjuntos borrosos

Los sistemas de control borroso utilizan reglas para asociar los valores lingüísticos de las variables de entrada con los valores lingüísticos de las variables de salida. El comportamiento determinado por estas reglas tiene que ser flexible y robusto. Además, las reglas se formulan como afirmaciones condicionales (IF) borrosas en las que la combinación de unos valores lingüísticos de entrada (AND, OR) se corresponde (THEN) con una combinación de valores de las variables de salida. De la misma manera que se traduce los valores numéricos de las variables al lenguaje borroso para adaptarlos a la lógica borrosa, a la hora de dar una salida las funciones de pertenencia de los conjuntos de las variables de salida sirven para que el control pueda generar salidas con valores numéricos, pasando del valor lingüístico al valor numérico.

Para diseñar un control borroso es necesario conocer la manera en que un experto controla el sistema para poder incluir las variables, correlaciones y actuaciones importantes del sistema. Organizando esta información se determinan las funciones de pertenencia de los conjuntos borrosos y las reglas que relacionan los valores lingüísticos con acciones de control específicas.

Para programar este tipo de controles existen distintas ayudas. Una opción interesante es programar el control borroso en MATLAB. MATLAB incorpora el

Fuzzy Logic Toolbox [12] [13]que permite un desarrollo y análisis sencillo e intuitivo de las funciones de pertenencia y las reglas (ver Figura 5).

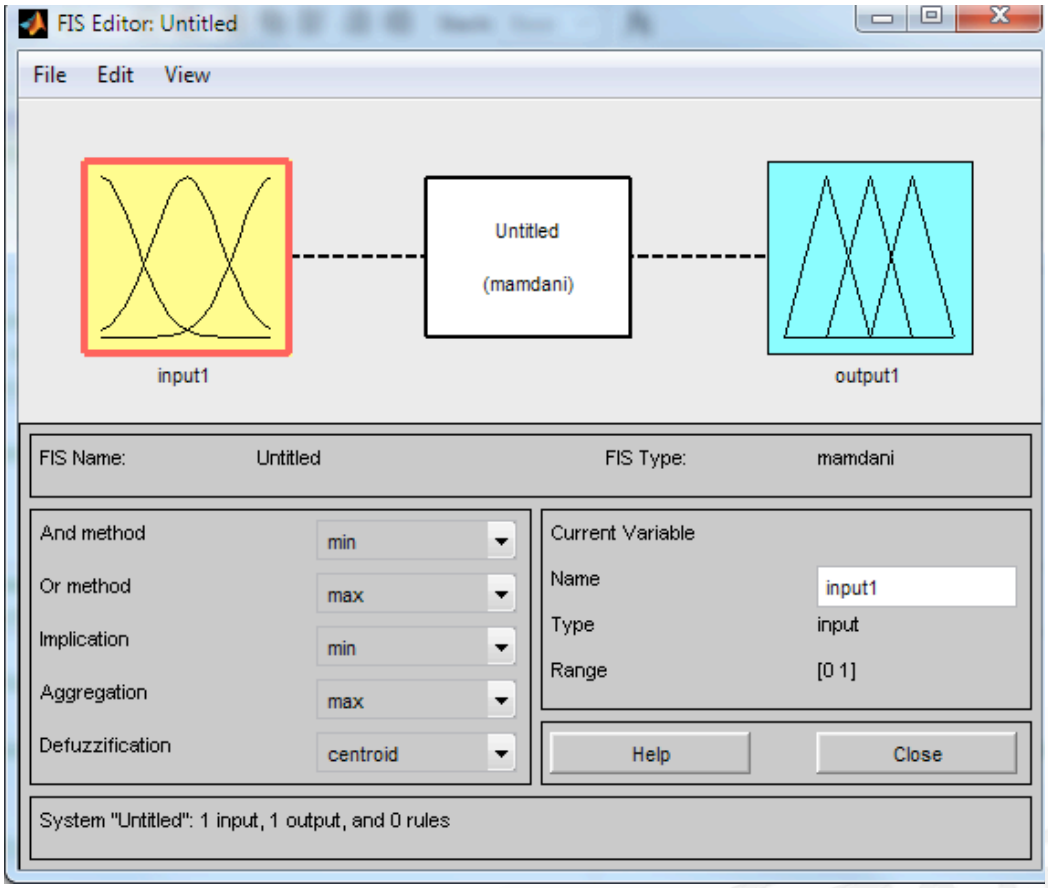


Figura 5. Matlab Fuzzy Logic Toolbox

1.1.3 SISTEMAS DE ACTUACIÓN

La última parte del proceso es la actuación sobre las variables controlables para conseguir el comportamiento deseado. Las dos variables principales que hay que controlar en el caso de la navegación de un vehículo son la velocidad y la dirección. En la sección 1.1.2 (pág.10) se han explicado varios de los sistemas que se utilizan para medir la orientación y el giro del vehículo pero no se ha hablado de la forma de conseguir que se lleven a cabo los giros.

Muchos de los vehículos autónomos que pueden encontrarse en la literatura [2][3][6][6][8][14][14] se han desarrollado a partir de vehículos convencionales,

es decir fabricados para ser guiados por un conductor, a los que se han incorporado sistemas que suplen la ausencia del conductor permitiendo realizar de un modo autónomo las mismas las acciones que haría un conductor. En otras palabras, los sistemas de actuación que se incorporan tienen que ser capaces de replicar la actuación del ser humano.

Hay muchos proyectos dedicados a la implementación y funcionamiento de actuadores en vehículos autónomos pero para la realización de este proyecto es particularmente interesante uno desarrollado por la Universidad de Carolina del Norte (EE.UU.) en el que el vehículo que se automatiza es un quad (ver Figura 6). En este proyecto los sistemas de actuación son tres [14]: el sistema de actuación sobre la dirección, el sistema de actuación sobre el acelerador y el sistema de actuación sobre el freno.

Figura 6. Quad autónomo de la Universidad de Carolina del Norte

Para controlar la dirección se han servido del motor de dirección asistida [14], que es un motor de corriente continua que, mediante un mecanismo, produce un par en el eje de dirección en el sentido en el que el conductor está realizando el giro. En condiciones normales el sistema de dirección asistida cuenta con un sensor que

mide el par y el sentido del par que hace el conductor del quad para girar en una dirección. La información es transmitida a una unidad de control y desde ahí se manda una señal al motor para que entregue un par concreto. Al trabajar a tensiones bajas (12V) necesita corrientes muy altas lo que complica el diseño de un sistema que controle la potencia que le llega al motor. Por ello intentaron sustituir el sensor del sistema de dirección asistida por una señal controlada por ellos pero no pudieron generar una señal que enviase a la unidad de control la misma información que el sensor. No teniendo otra alternativa, abordaron el problema del control del motor utilizando un puente en H (con capacidad para aguantar el paso de 40A) controlado desde un microcontrolador. El flujo de potencia lo controlan con una señal PWM que modula el tiempo que el circuito del puente en H está activado dentro de una frecuencia determinada. Para controlar el giro del eje utilizaron un control PID cuya salida era la variación del ancho de pulso de la señal PWM y cuya realimentación era el giro del eje. Este de giro del eje lo obtenían mediante un encoder, que es un dispositivo que genera una señal proporcional al ángulo girado por su eje. Además, añadieron un disipador de calor con mucha capacidad para proteger los componentes electrónicos de temperaturas extremas.

Los otros dos sistemas de actuación son los encargados de controlar la velocidad del vehículo. La actuación sobre el acelerador la resolvieron con un servomotor cuyo eje estaba unido al eje del acelerador. De esta manera el giro que realizaba el servomotor lo transmitía al acelerador. El control del freno se llevó a cabo con la instalación de un prototipo de aluminio bastante grande que actuaba sobre el freno de pie.

1.1.4 AUTOTRAC UNIVERSAL 200

John Deere es una empresa dedicada a la maquinaria agrícola que ha desarrollado un gran número de proyectos dentro de la agricultura de precisión y en concreto, en los últimos años, han desarrollado dispositivos y software orientado a la navegación guiada de flotas con el objetivo de mejorar el rendimiento de los

cultivos y las cosechas. Entre los dispositivos comerciales cabe mención el AutoTrac Universal 2009, un dispositivo que puede ser instalado en cualquier tractor permitiendo una navegación autónoma guiada por GPS. Las principales características de este sistema son la facilidad de instalación, el guiado automático del tractor, el incremento en le rendimiento de las cosechas que se obtiene y la generalidad del dispositivo que puede ser instalado en cualquier tipo de tractor. Sin embargo, la principal limitación de este sistema es que sólo sirve para el guiado automático en línea recta. Para el giro de los tractores es necesario instalar el sistema iTEC Pro que sólo se puede instalar en algunos modelos John Deere limitando mucho la universalidad del sistema AutoTrac 2009. Si además se quiere mejorar la productividad grabando las labores en el campo y su posterior análisis hay que recurrir a otro sistema llamado Land Data Eurosoft.

1.2 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

Debido al aumento de la población mundial se estima que la producción agrícola debería doblarse [8] para poder satisfacer las necesidades mundiales. Sin embargo, los recursos agrícolas ya están siendo explotados al límite o incluso sobreexplotados. Por ello, la única manera de conseguir aumentar la producción agrícola es aumentar el rendimiento de los recursos y esto, en parte, se puede conseguir mediante lo que se conoce como agricultura de precisión. Para llevar a cabo una agricultura de precisión es necesario monitorizar el estado del terreno y cultivo en las distintas etapas mediante la inspección. La inspección del terreno y cultivo se puede hacer eficientemente mediante un vehículo todoterreno autónomo que consuma poco combustible y tenga un precio lo más reducido posible. Estas características convergen en el quad, con un consumo mucho menor que el de un tractor y que además produce una menor compactación del terreno. De hecho se trata del vehículo que utilizan habitualmente los operarios para inspeccionar algunas zonas del terreno y llevar pesos ligeros a distintas zonas de las explotaciones. Por ello, parece una opción pertinente utilizar un quad como

plataforma base para lograr un vehículo de inspección que autónomamente recorra una explotación.

1.3 OBJETIVOS

El objetivo de este proyecto es, partiendo de un quad convencional, desarrollar e incorporar sistemas que permitan su navegación autónoma en cultivos. Este objetivo se puede subdividir en los siguientes objetivos:

- Desarrollo e instalación de sistemas que permitan conocer el estado de las variables de navegación (velocidad y dirección).
- Envío y recepción de instrucciones de navegación de forma inalámbrica.
- Procesado de tanto las instrucciones como el estado de las variables y la toma de decisiones en función de esta información mediante controles.
- Desarrollo e instalación de sistemas de actuación que ejecuten las decisiones tomadas por los controles.

1.4 RECURSOS / HERRAMIENTAS EMPLEADAS

¿Qué se ha utilizado para realizar el proyecto?

Los recursos y herramientas utilizadas son los siguientes:

- Hardware
    - Arduino UNO
    - IMU (MPU 6050)
    - Servomotor Futaba S3102
    - Solenoide – Actuador lineal
    - Receptor GPS-RTK Hemisphere R220
    - Dos ordenadores

- Componentes electrónicos (tarjetas, cables, relés, transistores, resistencias, etc.)
- Equipo de soldadura
- Quad
- Batería de plomo ácido 12V

- Instalaciones
  - Taller de electrónica
  - Taller mecánico para fabricación de piezas
- Software
  - Arduino IDE
  - Orcad
- Piezas mecánicas
  - Soporte del actuador
  - Sistemas de actuación (lineal, servomotor, etc.)
  - Cubremanos

Capítulo 2 ARQUITECTURA DEL SISTEMA

2.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se van a explicar detalladamente los distintos bloques en los que se organiza el proyecto y la relación entre ellos siguiendo el esquema que se muestra en la Figura 7, donde el código de colores sirve para identificar los distintos niveles. Así, en verde aparecen los bloques encargados de enviar las instrucciones que contienen los parámetros a seguir en la navegación. En azul están los bloques que proporcionan información acerca del estado de las variables que se van a controlar (giro del eje y velocidad). El bloque rojo es el encargado de traducir la información que le llega tanto de las instrucciones de navegación como la lectura de la velocidad del GPS. Con las instrucciones recibidas y el estado de las variables conocido es necesario procesar la información y generar unas señales que ejecuten las instrucciones necesarias para que el quad siga el comportamiento deseado. Todo esto se lleva a cabo en el microcontrolador[1], que es un circuito integrado en el cuya memoria se pueden almacenar instrucciones programadas, recibir información y procesarla y generar señales para interactuar con dispositivos periféricos. En este proyecto, el microcontrolador que se va a utilizar es el ATmega 328 incorporado en la placa Arduino UNO y tiene la función de procesar las instrucciones, el estado de las variables de navegación, tomar unas decisiones y comunicarlas mediante señales electrónicas a los sistemas de actuación.

Aunque el destino final de estas señales son los actuadores, necesitan ser adaptadas a las características concretas de cada actuador. Esta adaptación se lleva

[1] El microcontrolador que se utiliza en este proyecto es el ATmega 328 que está incorporado en la placa Arduino UNO. En la sección dedicada al microcontrolador se explica más detalladamente las características de la placa y del microcontrolador

a cabo en las tarjetas electrónicas (tarjeta de velocidad, tarjeta de freno y tarjeta de dirección). Finalmente, en gris, se incluye un módulo SD que almacena el estado de las variables de navegación (velocidad y orientación del eje) y los comandos que recibe el microcontrolador para poder comprobar el funcionamiento del sistema.

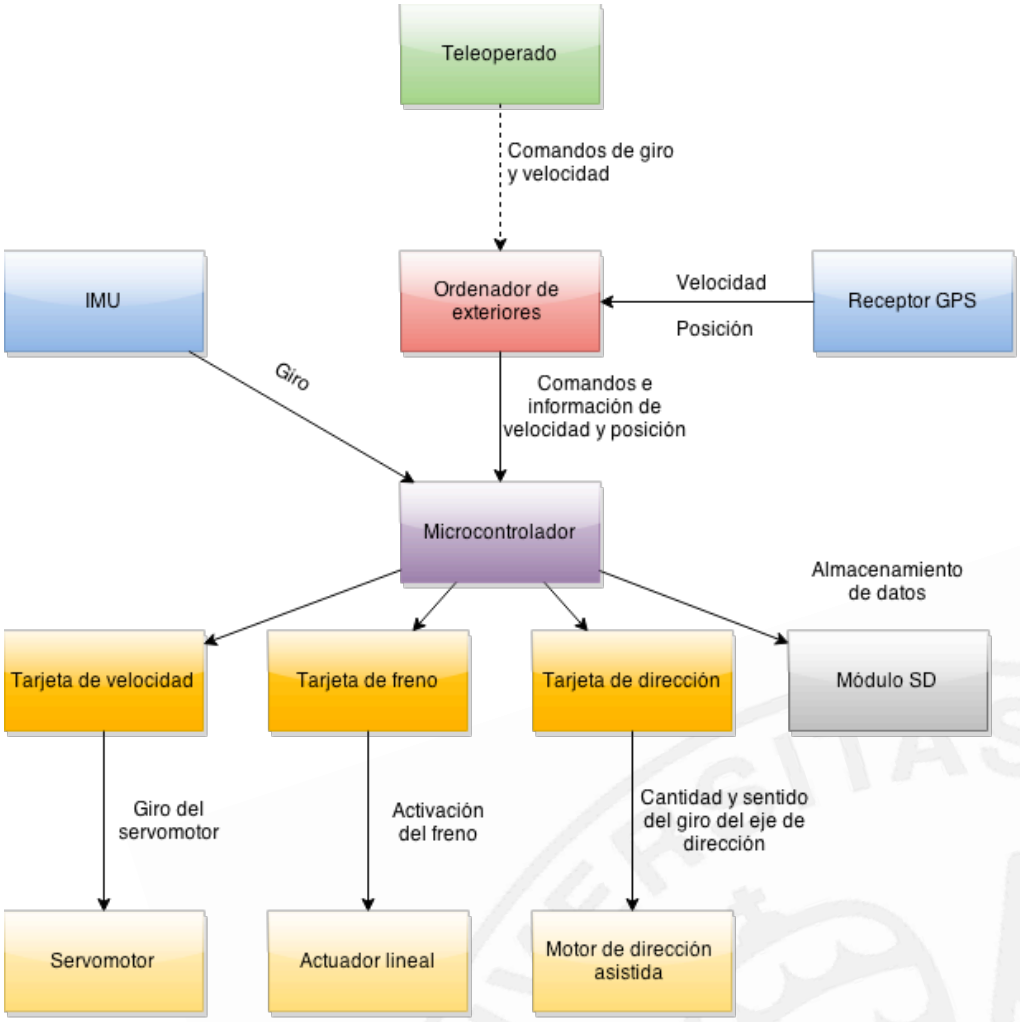


Figura 7. Arquitectura del sistema

Además, en la Figura 8 se muestra el quad Yamaha utilizado y se indican los sistemas que se le han añadido para su puesta a punto para la navegación autónoma. En los siguientes apartados están dedicados a explicar las características y el funcionamiento de cada bloque.

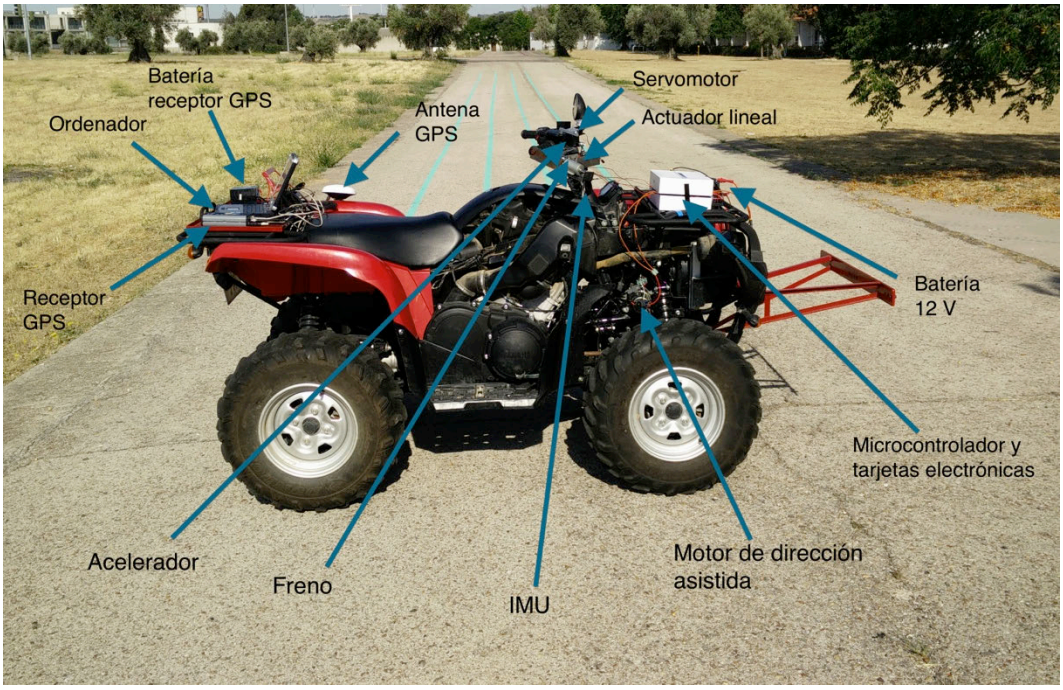


Figura 8. Quad Yamaha Grizzly 700 con los sistemas incorporados

2.2 TELEOPERADO

El objetivo final es lograr que el quad navegue de forma autónoma a partir de la posición GPS y siguiendo la ruta que se le ha enviado previamente, para ello primeramente se integrarán en el quad todos los mecanismos que nos permitan teleoperarlo y con ello comprobar que el funcionamiento de los sistemas que intervienen es el adecuado para la ejecución de las ordenes enviadas al quad.

Para poder controlar el quad a distancia es necesario que haya una conexión entre el dispositivo que envía la señal y el dispositivo que la recibe. La forma en la que se van a conectar los dispositivos es mediante WiFi y el operario puede definir las ordenes a enviar mediante una interfaz gráfica como la que se muestra en la Figura 9. A través de esta interfaz se envían los valores de la velocidad a la que se quiere que se desplace el quad y el ángulo de giro para el eje de dirección.

Además, se puede activar la conexión al receptor GPS lo que permite calcular la velocidad a la que se mueve el vehículo.

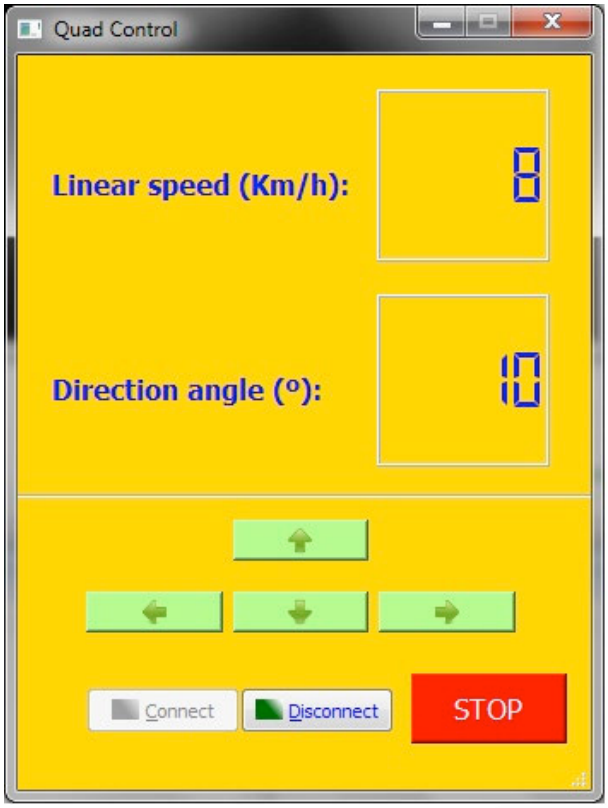


Figura 9. Interfaz de control teleoperado

Asimismo, como en futuros trabajos se incorporará una dotación sensorial que incluye cámaras tanto para guiar el vehículo como para realizar la inspección, en este primer prototipo se integra también un ordenador de exteriores que procesará las instrucciones enviadas por el operador que dispondrá a su vez de un ordenador portátil en el que se ejecutará la interfaz de teleoperación del quad.

2.3 RECEPTOR GPS

Desde hace unos años se han introducido en los coches sistemas de navegación GPS que permiten conocer la posición del coche, relacionarla con unos mapas y dar indicaciones al conductor sobre la ruta a seguir. En la agricultura también se

utilizan receptores GPS [8] fundamentalmente para guiar de forma precisa tractores a través de los cultivos.

En el mercado se pueden encontrar una gran variedad de dispositivos GPS. Así, algunos dispositivos que incluyen información adicional a la localización, como la velocidad de movimiento del receptor. Este tipo de dispositivos permiten supervisar que el vehículo se mueve a la velocidad establecida siguiendo la ruta fijada.

En el Centro de Automática y Robótica (CSIC-UPM) se utiliza el equipo Hemisphere R220[2], un receptor RTK (Real Time Kinematic) muy preciso que proporciona tanto la posición (con un error por debajo del centímetro) como la velocidad (con un error inferior a 0.07 m/s aunque en este proyecto se le asigna un valor entero) a la que se está desplazando el vehículo. Este receptor, tal y como se muestra en la Figura 10, está conectado a dos dispositivos: el ordenador portátil a bordo del quad y la antena GPS. En la conexión con la antena se utiliza un puerto serie RS232 mientras que para la conexión con el ordenador se utiliza un puerto serie RS323 y un puerto USB.

Figura 10. Conexiones del receptor GPS

[2] Se puede consultar más información sobre este dispositivo y su manual de usuario en la dirección http://www.trueheading.se/es/r220

En la Figura 11 se muestra una imagen del receptor y procesador de la señal GPS. En la parte superior del dispositivo se pueden apreciar tres luces con unos iconos debajo. Estas luces sirven para informar al usuario acerca del estado de la señal GPS. Al encender el dispositivo se enciende la luz roja de la izquierda y si no hay señales GPS disponibles será la única luz encendida. La luz del centro es de color ámbar y se enciende en el caso de que haya señales GPS disponibles. Como se ha mencionado anteriormente este dispositivo es un receptor RTK por lo que recibe las correcciones diferenciales que le suministra el ordenador, este último las recibe de la base que las proporciona a través de Internet (acceso con la conexión WiFi del Centro de Automática y Robótica o con un servicio de datos Movistar). Para que el usuario conozca la calidad de la señal GPS (precisión), la luz verde de la derecha se encenderá de manera continua si la señal llega con calidad y parpadeará en caso contrario. Cuando la señal llega con la corrección RTK se encenderán sin parpadear y en verde las dos luces de la derecha.

Figura 11. Receptor GPS Hemisphere R220

La Figura 12 muestra una imagen de la antena que recibe las señales GPS.

Figura 12. Antena GPS

2.4 IMU

Una Unidad de Medición Inercial (Inertial Measurement Unit - IMU) es un dispositivo que se utiliza para medir aceleraciones y sus variaciones. Las IMUs se suelen utilizar adheridas a objetos para conocer los giros que sufren (ver Figura 13). En este proyecto se utiliza para conocer el ángulo que ha girado el vehículo y poder comprobar si es el ángulo deseado. En otras palabras, la IMU proporciona la información del error que se produce en el seguimiento de la orden de giro.

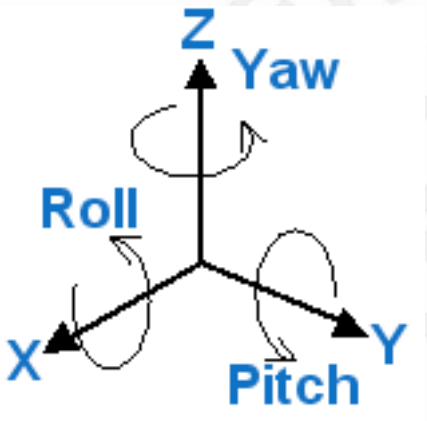


Figura 13. Ángulos de giro

La IMU que se utilizar en este proyecto es la MPU 6050 (ver Figura 14) que utiliza el protocolo I2C [16] para la comunicación. Por tanto, para poder realizar la lectura de los datos transmitidos por la IMU es necesario incluir las librerías de I2C para Arduino. Aunque la IMU proporciona información sobre los giros en los tres ejes en este proyecto sólo se va a utilizar la información relacionada con el giro del eje de dirección del quad, para ello se ha instalado la IMU en el quad de forma que la lectura del ángulo girado por el eje coincida con el ángulo yaw medido por la IMU tal como se muestra en la Figura 15.

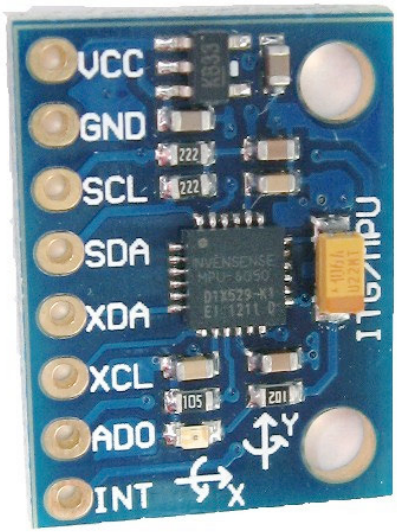


Figura 14. IMU MPU-6050

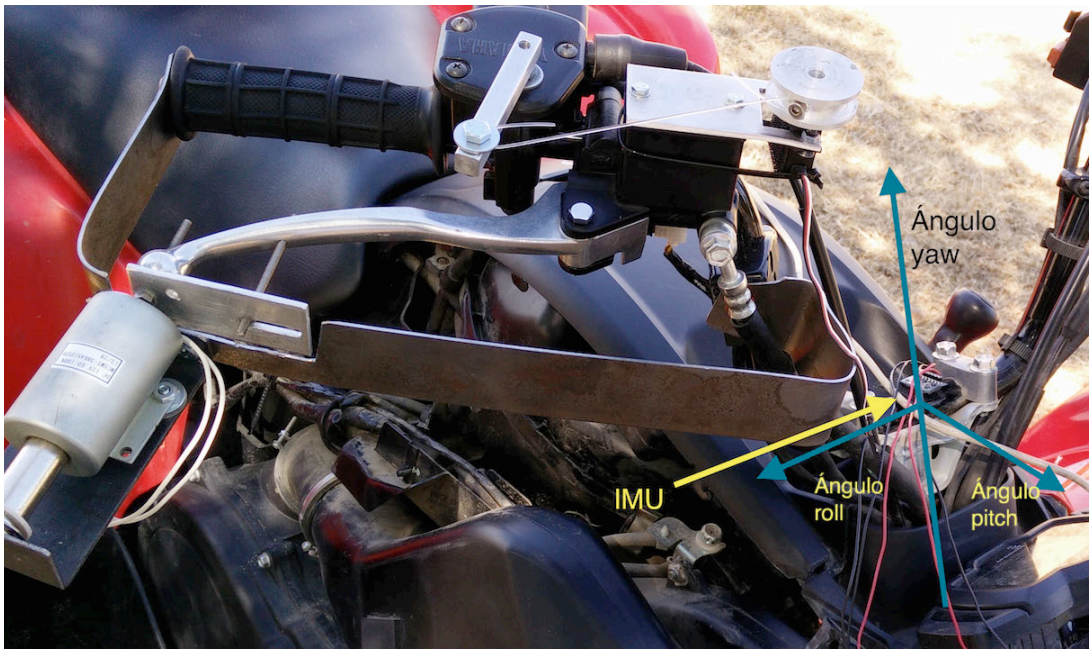


Figura 15. Localización de la IMU en el quad

Después de la descripción general del funcionamiento de la IMU utilizada se pasa a explicar las características de este dispositivo. Los pines que se utilizan en este trabajo son VCC, GND, SCL, SDA (ver Figura 14). Los pines VCC y GND deben estar conectados a 5V y a la tierra del Arduino para que la IMU esté correctamente alimentada. Por su parte, SCL y SDA se conectan a los pines 4 y 5 de la placa Arduino para enviar la información sobre giros. Por último, en el protocolo I2C, SDA es el bus de datos mientras que SCL es el bus del reloj siendo ambos buses bidireccionales [16]

2.5 ORDENADORES DE A BORDO Y DEL OPERARIO

El ordenador es un Panasonic CF-19[3] preparado para el uso en exteriores y situaciones extremas (polvo, vibraciones, etc.). En este proyecto se utilizarían dos

[3] Se puede encontrar información detallada acerca de las características del ordenador en la página del fabricante http://business.panasonic.es/soluciones-para-productos-informaticos/gama-de-productos-de-panasonic-computer-product-solutions/nuestra-gama-de-productos-toughbook-de-panasonic/toughbooks-fully-ruggedized/cf-19

ordenadores de este modelo al estar preparado para el uso en exteriores, uno como ordenador del operario y el otro como ordenador a bordo del quad. El ordenador a bordo del quad tiene dos funciones principales: la comunicación con el receptor GPS y la comunicación vía WiFi con el ordenador del operario para interpretar los comandos/ordenes que se envían desde la interfaz de usuario. La información que recibe este ordenador es transmitida al microcontrolador (ver Figura 16). Es necesario que el ordenador de a bordo esté preparado para trabajar en condiciones extremas porque las vibraciones del quad, la exposición al Sol y al polvo podrían dañar un ordenador convencional. Asimismo es un futuro este ordenador será también el encargado del procesamiento de las imágenes.

Figura 16. Comunicación entre ordenadores y microcontrolador

2.6 SISTEMAS DE ACTUACIÓN

Teniendo los controles definidos, a continuación se explican los sistemas de actuación que traducen las señales de salida de los controles en actuaciones concretas. Estos sistemas se dividen en dos partes: unas tarjetas de control y alimentación de los actuadores y los propios actuadores.

Buscando simplificar al máximo las pruebas de las distintas partes de la electrónica del sistema se decidió separar en distintas tarjetas los circuitos que

controlan la dirección, el acelerador y el freno. De esta manera los errores se detectan más rápida y fácilmente al ser los circuitos en cada tarjeta menos complejos y por tanto con menos componentes electrónicos. Además, la revisión de las conexiones también es más sencilla.. En los siguientes apartados se explican las distintas tarjetas (electrónica) que se han diseñado y desarrollado.

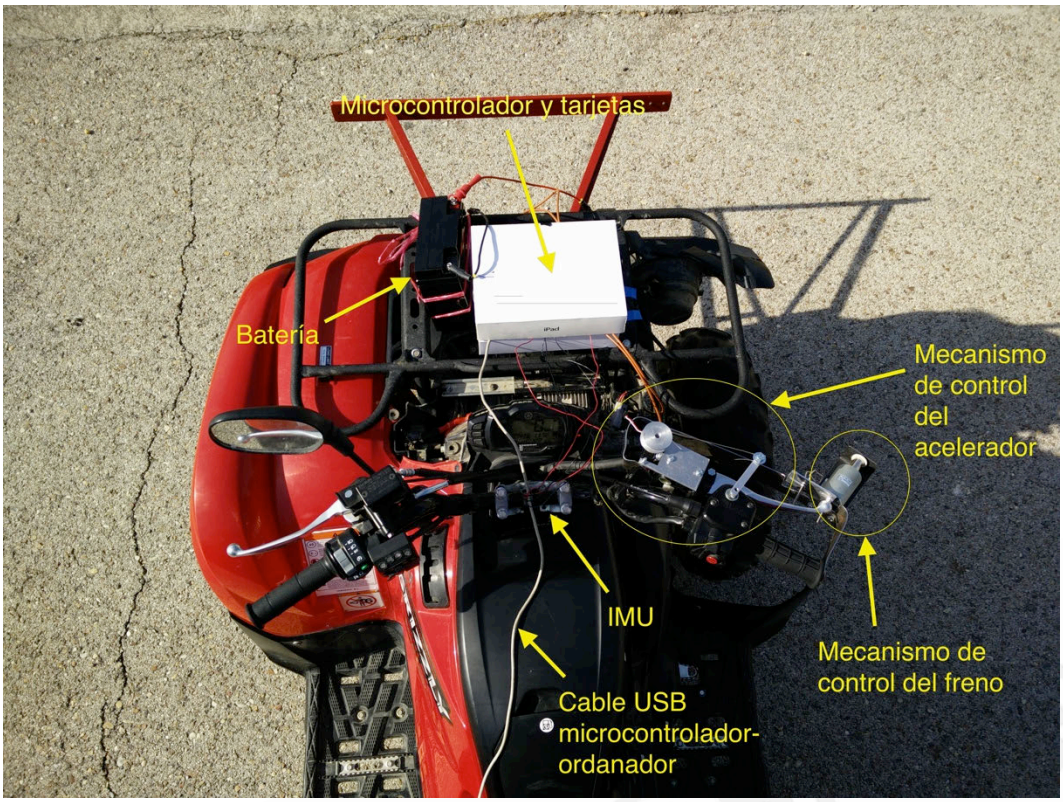


Figura 17. Localización de los sistemas de actuación sobre el freno y el acelerador

2.6.1 SISTEMA DE ACTUACIÓN SOBRE EL ACELERADOR

Este sistema está formado por una tarjeta con componentes electrónicos y un servomotor de giro limitado (180º); son los encargados de controlar el giro del acelerador y, en consecuencia, la aceleración del quad. El control del servomotor es bastante sencillo, ya que sólo tiene que estar alimentado y recibir una señal PWM que indica el ángulo que tiene que girar el servomotor. En muchos casos en los que el control del servomotor se hace desde el Arduino se utilizan las salidas de 5V y GND que tiene la tarjeta para alimentar el servomotor. Sin embargo, en

este caso con la placa de Arduino se van a controlar más cosas y no conviene utilizar mucha potencia eléctrica en alimentar los circuitos. Por ello, se ha decidido alimentar el servomotor que tiene una tensión nominal de 5V desde la batería 12V, necesitando para ello un regulador de tensión que convierte la tensión de la batería a la tensión nominal del servomotor y soporta la corriente nominal del servomotor. En la Figura 18 se muestra un esquema de las entradas y salidas del servomotor. En la Parte II (pág. 67) se detalla el plano de la tarjeta con sus componentes y conexiones.

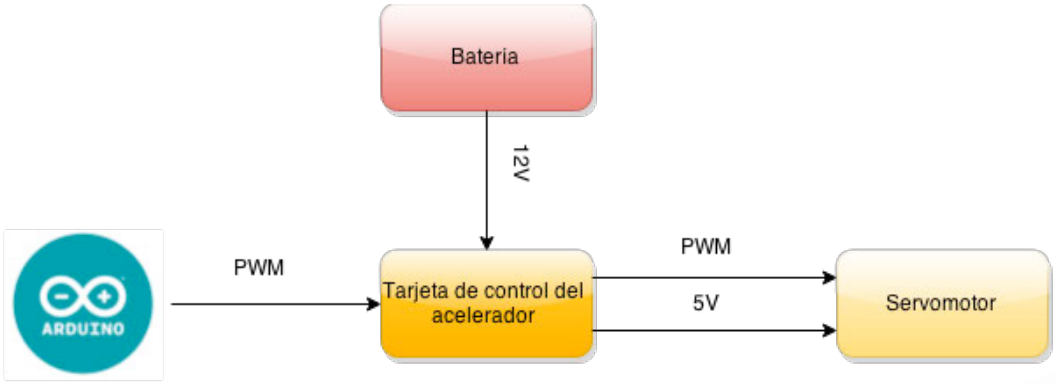


Figura 18. Esquema de la tarjeta de control del acelerador

Por otro lado, la actuación del servomotor sobre el giro del acelerador no es directa, es decir, el eje del acelerador no es solidario al del servomotor. En este proyecto se ha decidido incorporar un mecanismo como el que se muestra en la Figura 19 que permite que el servomotor no trabaje en sus condiciones límites reduciendo el esfuerzo que tiene que hacer para efectuar los giros del acelerador. El mecanismo enrolla el cable en el carrete y este cable tira de la pieza que se ha acoplado al eje del acelerador dando lugar a un par en el eje del acelerador que hace que éste gire proporcionalmente al giro del servomotor.

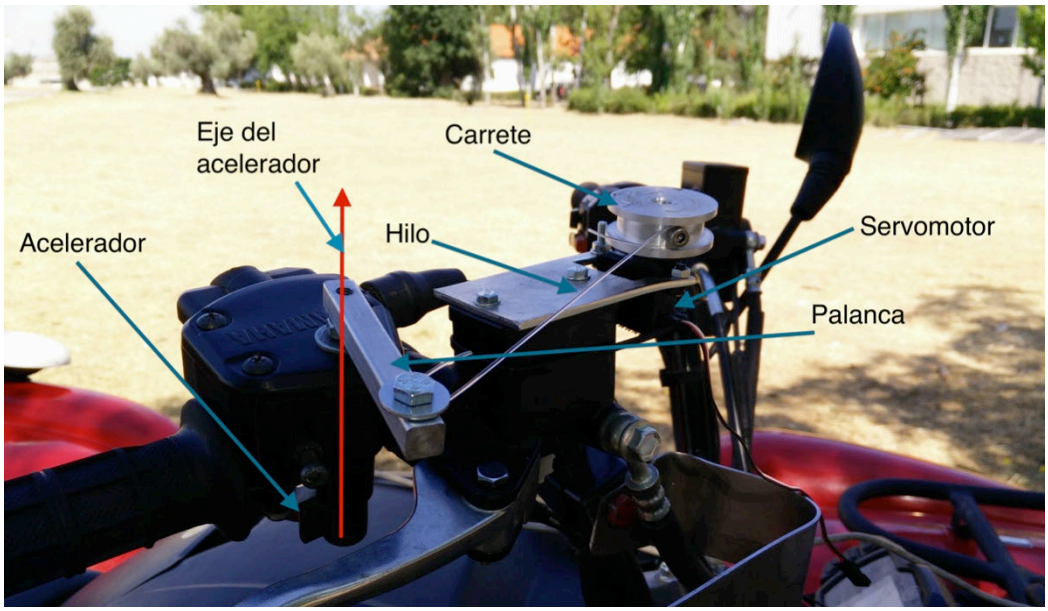


Figura 19. Mecanismo de giro del acelerador

2.6.2 SISTEMA DE ACTUACIÓN SOBRE EL FRENO

Aunque el quad se va a mover a velocidades muy bajas (el objetivo es que la velocidad esté alrededor de los 8 Km/h) y con dejar de acelerar el quad éste frenaría en pocos metros, es necesario que tenga incorporado un sistema de freno para poder efectuar un frenado rápido antes situaciones inesperadas. Para efectuar este frenado se ha diseñado un sistema basado en un actuador linear que simula la fuerza que hace un conductor sobre el freno. Hay una gran variedad de actuadores lineales en el mercado pero para activar el freno se necesita un actuador lineal muy rápido y por ello se ha elegido un solenoide lineal, con un tiempo de respuesta muy pequeño y con un recorrido suficientemente largo.

El funcionamiento del sistema es el que muestra en la Figura 20, la batería de 12V proporciona la alimentación a tensión nominal del actuador, también 12V, y el microcontrolador envía una señal a la tarjeta que activa o desactiva el circuito de alimentación del solenoide. La tarjeta de control del freno es la que activa o

desactiva el circuito en función de la señal que le llega del microcontrolador y además protege el microcontrolador de posibles perturbaciones incluyendo un optoacoplador para aislar la tarjeta Arduino del resto del circuito.

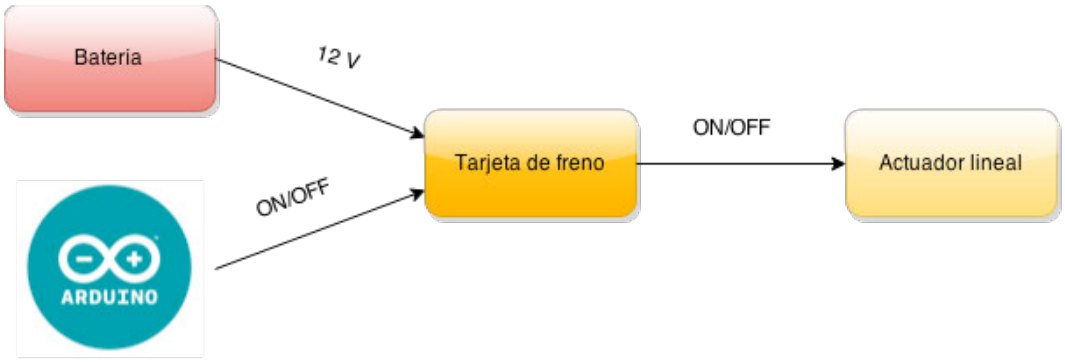


Figura 20. Esquema del sistema de actuación sobre el freno

Con la electrónica explicada y con el plano de la placa que se puede encontrar en la Parte II (pág. 67), sólo falta describir el mecanismo de accionamiento del freno. El mecanismo consta de un solenoide lineal que proporciona un movimiento lineal, de una pletina que permite transformar el movimiento lineal en el propio del freno en torno a su eje (ver Figura 21), y del mecanismo de freno hidráulico que viene incorporado en el quad. En la Figura 22 se muestra una foto del mecanismo en el que además se ve el cubremanos que se ha fabricado para poder ofrecer una superficie estable en la que apoyar el solenoide.

Figura 21. Secuencia de frenado: a) freno desactivado y b) freno activado.

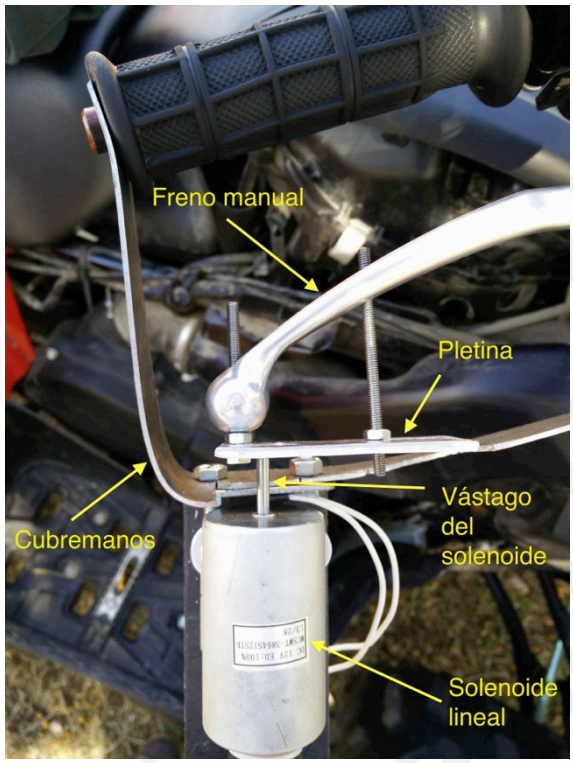


Figura 22. Mecanismo de actuación sobre el freno

2.6.3 SISTEMA DE ACTUACIÓN SOBRE LA DIRECCIÓN

Con los sistemas de actuación descritos se puede controlar la velocidad. En lo que sigue se detalla el sistema que se ha desarrollado para controlar la dirección del quad. Aunque se puede controlar la velocidad de distintas formas ejerciendo un par sobre el manillar, se ha pensado en utilizar, al igual que hicieron en la Universidad de Carolina del Norte (EE.UU) [14], el motor de dirección asistida que tiene el quad como medio de actuación sobre el eje de dirección. Este motor está diseñado para aportar un par que ayude al conductor a realizar los giros con poco esfuerzo pero no está diseñado para ser el único par que actúa sobre la dirección. Por lo tanto, uno de los problemas que puede aparecer es que este sistema no sea capaz de realizar los giros por si solo.

Lo primero que hay que hacer para ver si el motor de dirección asistida es capaz de girar el eje sin fuerzas externas, es realizar alguna prueba que nos dé información sobre la capacidad del motor de la dirección asistida. Las pruebas que se llevaron cabo eran para medir la fuerza que había que ejercer para girar manualmente el eje al máximo, es decir la fuerza ejercida en el manillar. La medida de la fuerza se llevo a cabo mediante un dinamómetro que se enganchaba al manillar y se tiraba de él para que midiese la fuerza necesaria para realizar los giros.

Las pruebas se realizaron en dos superficies distintas (asfalto y césped) para tener más información de las posibles limitaciones Los resultados se muestran en la Tabla 1.

	Reposo	**Movimiento**
Asfalto	14 Kg	3 Kg
Césped	18 Kg	4 Kg

Tabla 1. Fuerzas aplicadas en el manillar para girar el quad

Como se ve en la tabla, en reposo hay que ejercer una fuerza bastante grande mientras que en movimiento esta fuerza es mucho menor. La razón es que el

coeficiente de rozamiento estático es muy superior al dinámico y esto hace que haya que vencer una fuerza de rozamiento muy superior cuando el vehículo está parado. Aunque podría parecer que el motor de dirección asistida necesita la fuerza que ejerce la persona para girar lo que ocurre es que, sin el sistema de actuación sobre la dirección, necesita medir el par que ejercer el conductor sobre el eje para ponerse en marcha. La medición del par la lleva a cabo un sensor que envía la información a una unidad de control que genera señales que controlan el motor de dirección asistida. Por lo tanto, si vamos a controlar el motor directamente no tiene que preocuparnos el funcionamiento de la unidad de control integrada en el quad.

Si se decide controlar directamente el motor de dirección asistida que se muestra en la Figura 23 es necesario conocer sus condiciones de trabajo nominales para evitar sobrepasar sus límites de funcionamiento. Sin embargo, no se dispone de estos datos y es necesario obtenerlos experimentalmente. Para conocer las condiciones de trabajo del motor de continua se realizaron dos pruebas: una para medir la tensión de entrada del motor y otra para conocer la intensidad.

En las dos pruebas se bloqueó la rueda impidiendo que se moviese y se intentó girar el eje para que el sensor de par que envía la información a la unidad de control detectase que el motor se tenía que poner en marcha y ejercer un par muy grande para contrarrestar el bloqueo de la rueda. Los valores de la tensión e intensidad medidas se muestran en la Tabla 2.

Figura 23. Motor de dirección asistida

	Valor mínimo	**Valor máximo**
Corriente (A)	-30	30
Tensión (V)	-12	12

Tabla 2. Condiciones de trabajo del motor de dirección asistida

De los resultados que se muestran en la Tabla 2 sorprende lo grande que es la corriente que llega a circular y esto limita mucho el tipo de componentes electrónicos que se pueden utilizar para controlar la potencia que se transmite al motor. Este valor de la corriente se interpreta mejor considerando la tensión a la que trabaja el motor que es muy baja pues coincide con la tensión de la batería que alimenta los circuitos del quad. En la Figura 24 se incluye un esquema del sistema de actuación sobre la dirección y en la Figura 25 se puede ver un esquema de los bloques de la tarjeta que controla la actuación sobre la dirección.

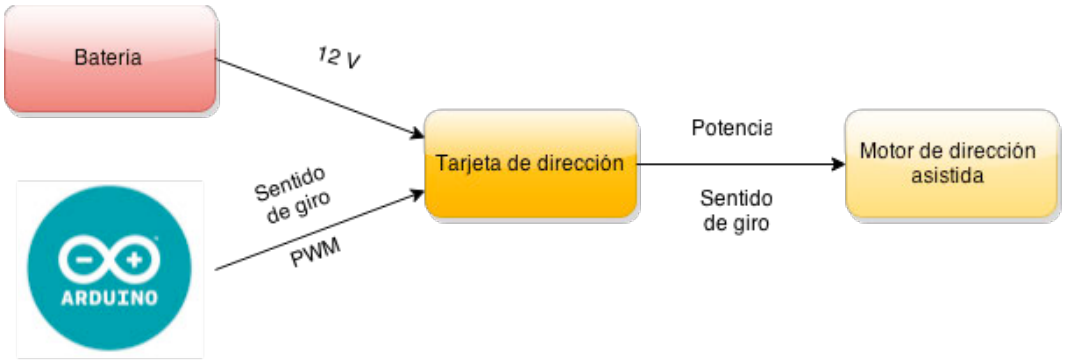


Figura 24. Esquema del sistema de actuación sobre la dirección

En el control de la dirección hay que controlar principalmente dos variables: la cantidad de giro o potencia que llega al motor y el sentido del giro a realizar. En el control del acelerador se explicaba que para enviar al servomotor la información con el giro que tenía que efectuar se utilizaba una señal PWM. Sin embargo, este no es el único uso que tiene este tipo de señales ya que también se utilizan en la electrónica de potencia para regular la alimentación de los circuitos activando y desactivando la alimentación.

Para el control del motor de dirección asistida es necesario controlar la tensión y potencia que recibe el motor y se va a llevar a cabo con una señal PWM. La regulación de tensión y potencia se consigue activando el circuito cuando la señal que llega al circuito de control es notablemente superior a 0 y desactivando el circuito cuando el valor de la señal es nulo. De esta manera, con una señal PWM se activaría el circuito durante el tiempo que la señal tenga un valor distinto de 0 y se desactivaría en caso contrario. Con esto se consigue reducir la potencia que llega, disminuyendo el ancho del pulso de la señal PWM, o aumentar la potencia, incrementando este valor. La activación del circuito se realiza llevando un transistor de potencia a su zona de saturación y la desactivación se logra alcanzando la situación de corte.

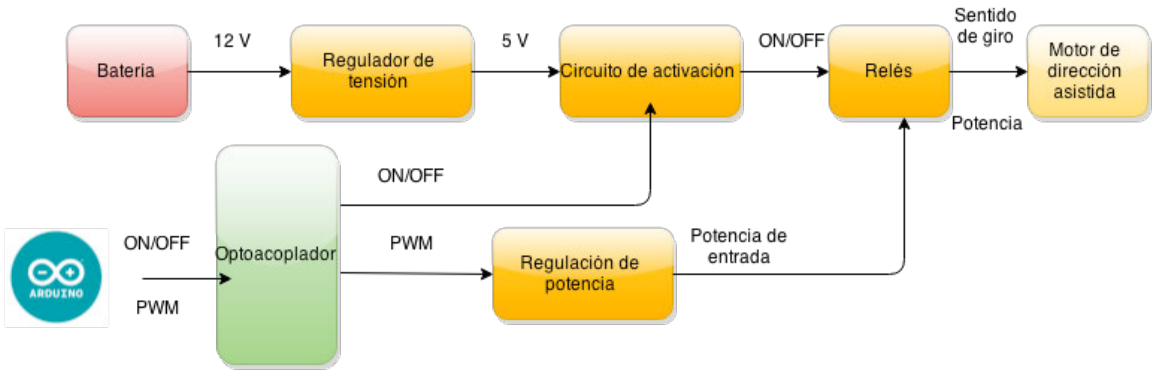


Figura 25. Esquema de la tarjeta de dirección

Teniendo controlada la potencia falta incluir el control del sentido de giro para completar el sistema de actuación sobre la dirección. Es muy frecuente controlar el sentido de giro mediante un circuito conocido como "Puente en H" [14] que invierte la alimentación del motor mediante la saturación o corte de transistores. Sin embargo, por la elevada corriente que circula por el motor finalmente se utilizan dos relés DPST que alimentan el motor de manera inversa, de forma que sólo uno de los relés está activado cada vez y el que está activado es el que alimenta el motor. Para activar estos relés es necesario una señal de 5V y una corriente de 141 mA y no puede hacerse directamente desde la Arduino porque se ha conectado un optoacoplador que aísla la placa del resto del circuito. Por ello, se incluye un regulador de tensión que transforma los 12V de la batería a 5V y un circuito de activación con transistores que sí se pueden activar desde la Arduino. Con esto ya se puede controlar el sentido del giro y se conectan los relés a la señal con la potencia regulada mediante PWM. El plano detallado del circuito se encuentra en la Parte II (pág. 67).

2.7 MICROCONTROLADOR – ARDUINO UNO

Una vez recibidas las ordenes o instrucciones y la información sobre el ángulo del eje de dirección y la velocidad a la que se está moviendo el quad, hay que tratar toda esta información para decidir las variaciones que hay que introducir en el

vehículo y el modo de comunicar estas variaciones al sistema de actuadores. Este paso lo puede ejecutar un microcontrolador ATmega328 y en este proyecto se va a utilizar el que se encuentra integrado en la tarjeta Arduino UNO. Algunos de los aspectos que han influido en la decisión son la gran cantidad de librerías tipo I2C que permiten una comunicación rápida y sencilla con otros dispositivos, la facilidad para alimentar la placa de distintas maneras (USB, Jack, pines de la placa) y el acceso gratuito a software de programación y de control de dispositivos. Las características del Arduino UNO se resumen en la Tabla 3.

Microcontroller	ATmega328
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (de los cuales 6 proporcionan una salida PWM)
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328) de los cuales 0.5 KB son usados por el gestor de arranque
SRAM	2 KB (ATmega328)
EEPROM	1 KB (ATmega328)
Clock Speed	16 MHz
Length	68.6 mm
Width	53.4 mm
Weight	25 g

Tabla 3. Características de la placa Arduino UNO

2.7.1 CONTROL BORROSO

El microcontrolador tiene la función de interpretar la información que recibe y de generar unas salidas sobre los actuadores con el objetivo de atender las órdenes que ha recibido el vehículo. Para generar estas salidas se tiene que decidir el tipo de control que se va a utilizar.

El objetivo del proyecto es conseguir desarrollar unos sistemas que puedan ser implantados en distintos modelos de quad, lo que implica que la planta que se quiere controlar va a ser diferente en cada quad. Esto impide que se pueda utilizar un control PID ya que este tipo de control necesita de un modelo preciso de la planta para poder alcanzar buenos resultados. Lo que se necesita es un control flexible y que tolere errores de modelado. Estas dos características están presentes en los controles borrosos.

Ya se ha explicado anteriormente la semejanza que estos controles tienen con el control que llevaría cabo una persona experta. A continuación, se explica el proceso seguido en el diseño de los controles borrosos de velocidad y dirección.

2.7.2 CONTROL BORROSO DE VELOCIDAD

Una de las primeras cosas que se necesita saber antes de realizar un giro del vehículo es la velocidad a la que se mueve . Por ello, siguiendo un orden de necesidad se ha desarrollado en primer lugar el control de velocidad para posteriormente desarrollar el control de giros.

Para diseñar un control borroso, lo primero es la observación del modo de operación del experto para poder identificar las variables. La primera variable que se deduce es la diferencia entre la velocidad a la que se quiere que vaya el vehículo (velocidad de referencia) y la medida de la velocidad real del vehículo (velocidad GPS al ser medida con el receptor GPS-RTK). A esta variable se le pone el nombre de error de velocidad y se define como la diferencia entre la velocidad de referencia y la velocidad GPS (Ecuación 1). Además, también se

observa que influye la rapidez con la que cambia este error. Por ejemplo, si se tiene un error de velocidad positivo pequeño y este error está disminuyendo rápidamente en poco tiempo se tendrá un error negativo sin poder estabilizar el error en un error nulo. Por lo tanto, se reconoce otra variable que recibe el nombre de variación del error de velocidad y se define como la diferencia entre una medida del error y la inmediatamente anterior (Ecuación 2).

$$Error\_velocidad_i = \text{Vref}_i - \text{Vgps}_{i-1} \quad (1)$$

$$Variación\_error\_velocidad_i = \text{Error\_velocidad}_i - \text{Error\_velocidad}_{i-1} \quad (2)$$

Además, se identifica una variable de salida, que es la aceleración o desaceleración del vehículo para ajustar la velocidad GPS a la velocidad de referencia. Esta variable de salida recibe el nombre de variación del ángulo ya que el sistema de actuación sobre el acelerador explicado previamente aumenta o disminuye la velocidad del quad cambiando el ángulo de giro del servomotor. Todas estas variables se pueden identificar en la Figura 17.

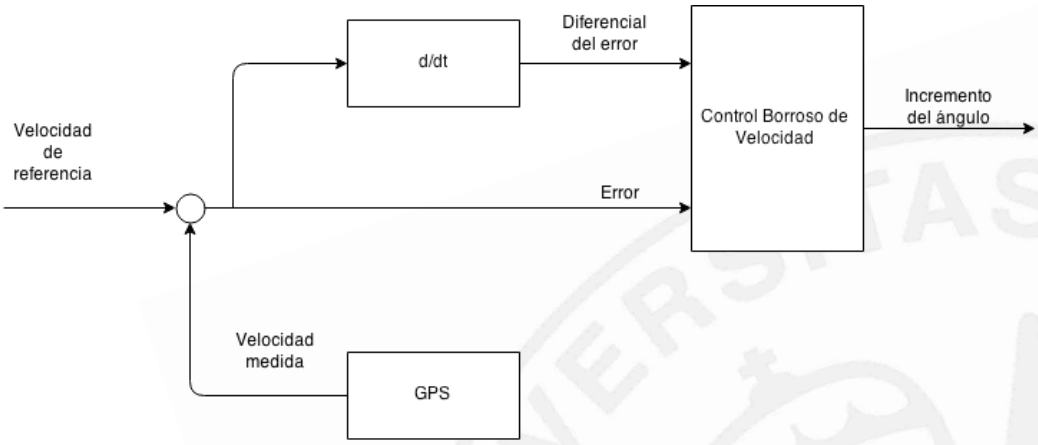


Figura 26. Esquema del control borroso de velocidad

Una vez definidas las variables del control se pasa a deducir los valores lingüísticos de las variables y a asignar a los distintos valores unos rangos con sus correspondientes funciones de pertenencia. Tanto en el error de velocidad como en la variación del error de velocidad se identifican cinco conjuntos borrosos: negativo grande (NG), negativo pequeño (NP), cero (Z), positivo pequeño (PP) y

positivo grande (PG). En la Tabla 4 se muestran los valores de los rangos y la forma de las funciones de pertenencia que se muestran en la Figura 27.

Como la precisión de la medida es muy alta (inferior a 0.07 m/s) se puede considerar que es casi exacta y no influye en los valores de los rangos de los conjuntos del error de velocidad. Los valores se han asignado buscando que el sistema mantenga una velocidad constante de 8 km/h, aceptando como error nulo (Z) aquellos valores comprendidos entre 7.5 y 8.5 km/h. Además, para que el sistema reaccione suavemente si el error es inferior a 3 km/h se definen los rangos de los conjuntos NG, NP, PP, PG.

Conjunto	Tipo de función	Extremos	Vértice
NG	Trapezoidal	-20, -2	8
NP	Triangular	-4, 0	-2
Z	Triangular	-0.5, 0.5	0
PP	Triangular	0, 4	2
PG	Trapezoidal	2, 20	8

Tabla 4. Rangos de los conjuntos del error de velocidad

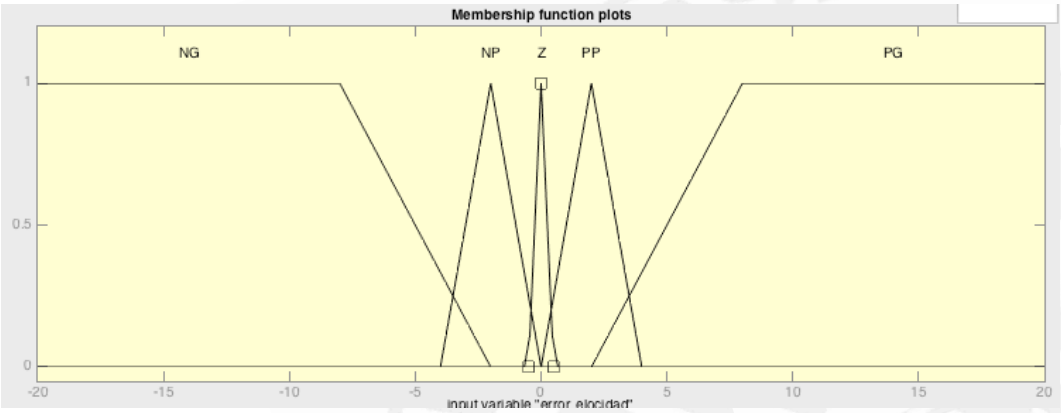


Figura 27. Funciones de pertenencia de los conjuntos del error de velocidad

De la misma forma que se han definido los conjuntos del error de velocidad, en la variación del error se definen los rangos de sus conjuntos borrosos en la Tabla 5 y

las funciones de pertenencia correspondientes en la Figura 28. Los valores de los rangos tienen que cubrir todas posibilidades posibles. Para ello, las variaciones superiores a 4 grados (positivas y negativas) se incluyen en los conjuntos NG y PG. Las variaciones pequeñas (hasta 4 grados) forman parte de los conjuntos NP y PP. Finalmente, cuando las variaciones son casi nulas se incluyen en el conjunto Z.

Conjunto	Tipo de función	Extremos	Vértice
NG	Trapezoidal	-20, -2	-8
NP	Triangular	-4, 0	-2
Z	Triangular	-1, 1	0
PP	Triangular	0, 4	2
PG	Trapezoidal	2, 20	8

Tabla 5. Rangos de los conjuntos de la variación del error de velocidad

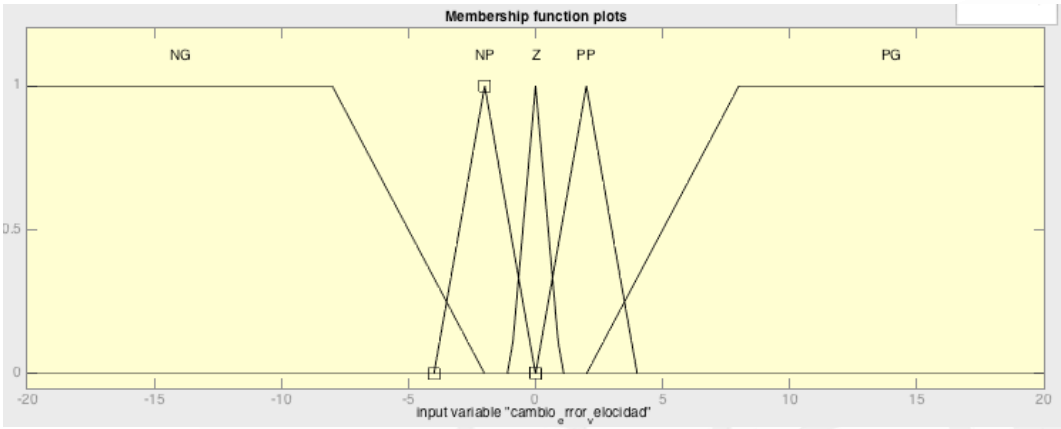


Figura 28. Funciones de pertenencia de los conjuntos de la variación del error de velocidad

En la variable de salida también se han identificado cinco conjuntos borrosos: negativo grande (NG), negativo pequeño (NP), cero (Z), positivo pequeño (PP) y positivo grande (PG). Los rangos de estos conjuntos borrosos se muestran en la Tabla 6 y la forma de las funciones de pertenencia de esta variable de salida en la Figura 29. Los valores de los conjuntos de salida se han determinado mediante las pruebas que se explican a continuación

Buscando conseguir una velocidad constante cercana a 8 km/h se escribieron unos programas concretos que indicaban al servomotor el ángulo que tenía que girar. De esta manera se obtuvo información acerca de la relación del ángulo girado por le servomotor y la aceleración y velocidad del quad. Entre otras cosas se descubrió que para un ángulo de 12º en el servomotor se obtenía una velocidad que variaba entre 8 y 9 km/h. También se observó que el servomotor sólo gira ángulos enteros, no teniendo en cuenta los decimales, y que al ser tan pequeño el ángulo que gira para estar cerca de la velocidad de referencia los incrementos del ángulo tienen que ser muy pequeños. A partir de los datos obtenidos en estas pruebas se asignaron los valores de los rangos de las funciones de pertenencia.

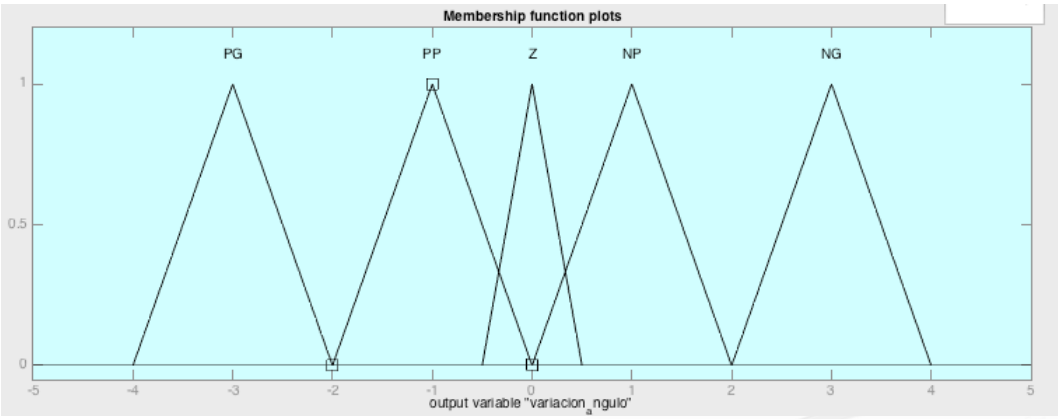


Figura 29. Funciones de pertenencia de la variación del ángulo del servomotor

Conjunto	Tipo de función	Extremos	Vértice
NG	Triangular	-4, -2	-3
NP	Triangular	-2, 0	-1
Z	Triangular	-0.5, 0.5	0
PP	Triangular	0, 2	1
PG	Triangular	2, 4	3

Tabla 6. Rangos de los conjuntos borrosos de la variación del ángulo del servomotor

Con las variables de entrada y la variable de salida del control definidas y caracterizadas se pasa a definir las relaciones entre las combinaciones de los valores de las variables de entrada y los valores de la variación del ángulo del servo (ver Tabla 7)

	Error					
Variación del error		NG	NP	Z	PP	PG
	NG	NG	NG	NP	NP	Z
	NP	NG	NP	NP	Z	PP
	Z	NP	NP	Z	PP	PP
	PP	NP	Z	PP	PP	PG
	PG	Z	PP	PP	PG	PG

Tabla 7. Reglas del control de velocidad

2.7.3 CONTROL BORROSO DE DIRECCIÓN

En el diseño del control borroso de dirección se van a seguir los mismos pasos que en el diseño del control de velocidad. En primer lugar se observa el modo de operación del experto para conocer las variables que hay que controlar. De esta observación se deduce que hay dos variables de entrada. La primera variable de entrada es la diferencia de ángulo que hay entre la dirección que se quiere que siga el quad (ángulo de referencia) y la dirección que está siguiendo (ángulo de la IMU). A esta variable se la nombra error de dirección y se define como la diferencia en ángulo entre la dirección que se quiere que siga el quad y la dirección que lee la IMU (Ecuación 3). La segunda variable de entrada es la rapidez con la que cambia este error de dirección. A esta variable se le llama variación del error de dirección y se define como la diferencia entra la medida de un error de dirección y el inmediatamente anterior (Ecuación 4).

$$Error\_dirección = Ángulo\_referencia - Ángulo\_IMU \quad (3)$$

$$Variación\_Error\_dirección_i = Error\_dirección_i - Error\_dirección_{i-1} \quad (4)$$

En el caso de la dirección, el control tiene dos salidas. La primera indica la cantidad de giro que se quiere realizar y la segunda indica el sentido del giro que se quiere efectuar. En la Figura 30 se puede apreciar un esquema del control borroso de dirección con las variables indicadas.

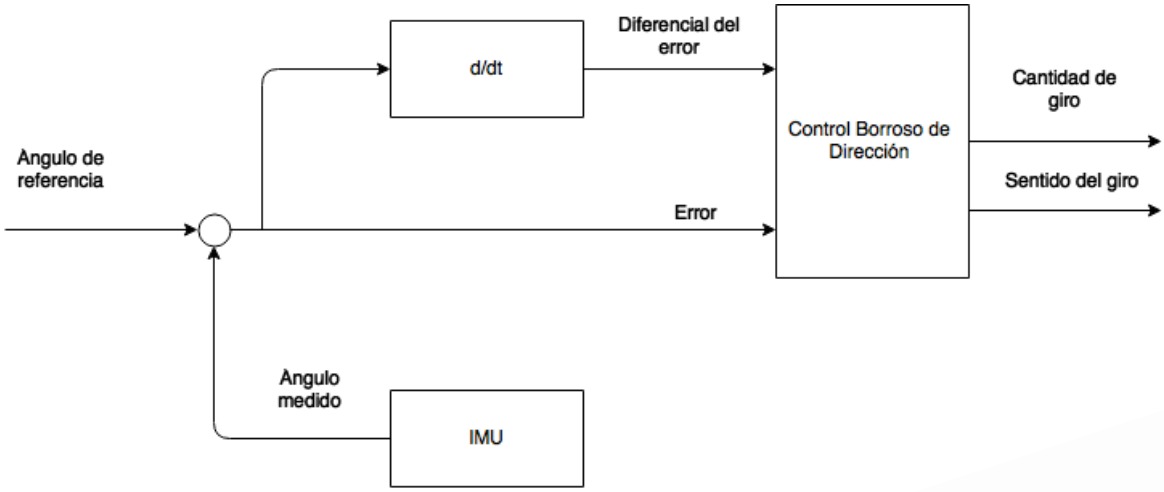


Figura 30. Esquema del control borroso de dirección

Teniendo las variables identificadas y definidas el siguiente paso en el diseño del control de dirección es determinar los conjuntos borrosos de cada variable y los rangos y forma de sus funciones de pertenencia. Al igual que en el control de velocidad, se definen los mismos cinco conjuntos borrosos para todas las variables: negativo grande (NG), negativo pequeño (NP), cero (Z), positivo pequeño (PP) y positivo grande (PG).

En el control de velocidad sí que influye la precisión de los instrumentos que se utilizan para medir el ángulo y por ello se buscará realizar las medidas con aquel que tenga mayor precisión y velocidad de respuesta de los dispositivos disponibles que son el receptor GPS-RTK, la IMU MPU-6050 y la brújula HMC-855L. Para determinar cuál era el más fiable se llevó a cabo una prueba en la que se recorría el circuito marcado en azul dentro del Centro de Automática y

Robótica del CSIC-UPM (ver Figura 31 sacada de Google Earth) guardando las medidas simultáneas de los tres dispositivos y poder realizar el estudio comparativo. El resultado que se espera es que los dispositivos sean capaces de medir cuatro giros de 90º efectuados en poco tiempo y un tiempo sin casi variación de la dirección.

Figura 31. Ruta seguida dentro del Centro de Automática y Robótica. Imagen de Google Earth

Los datos obtenidos en la prueba para determinar el sensor de giro se muestran en la Figura 32. Las conclusiones que se extraen del experimento llevado a cabo son las siguientes:

- La brújula no mide correctamente los ángulos
- En reposo el GPS no mide bien la orientación del quad, necesita movimiento para calcular la orientación de la recta que pasa por dos puntos consecutivos. En movimiento el GPS mide el giro del eje de dirección con mucha precisión pero con cierto retardo al estar la antena situada en la parte posterior del quad.
- La IMU mide bien los giros de 90º y mantiene el ángulo estable si no se está produciendo ningún giro. Además, al estar situada en el eje de dirección mide los giros al mismo tiempo que se realizan.

Teniendo en cuenta las conclusiones extraídas de esta prueba se considera que el sensor más apropiado de los tres para medir el ángulo girado por el eje de dirección es la IMU MPU-6050.

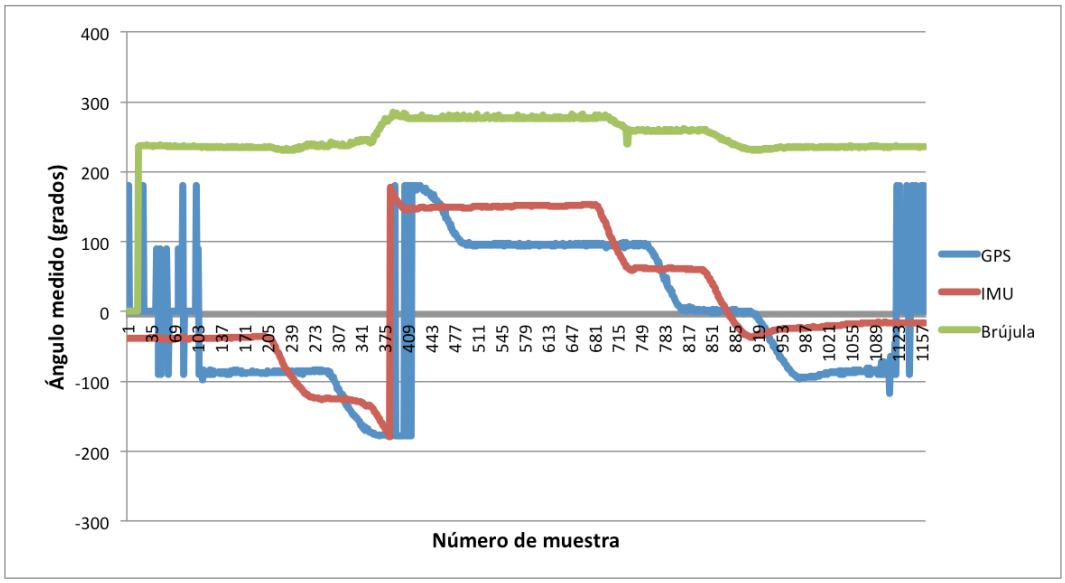


Figura 32. Comparación del ángulo medido por los sensores en la ruta

A diferencia de lo que ocurría en el control de velocidad, en este control la precisión de la medida tiene un impacto en los rangos de los conjuntos borrosos del error de dirección y, consecuentemente, en la variación del error de dirección. Observando el comportamiento de la IMU en la medida de ángulos mostrada en la Figura 32, se descubre que tiene un error de 3 grados. Por lo tanto, no tiene sentido que el rango del conjunto borroso de error nulo tenga un tamaño inferior a 6 grados. En la Tabla 8 se incluyen los rangos de los conjuntos del error de dirección y en la Figura 33 se muestran las funciones de pertenencia de estos conjuntos borrosos.

Conjunto	Tipo de función	Extremos	Vértice
NG	Trapezoidal	-180, -15	-30
NP	Triangular	--20, 0	-10
Z	Triangular	-5, 5	0
PP	Triangular	-0, 20	10
PG	Trapezoidal	15, 180	8

Tabla 8. Rangos de los conjuntos del error de dirección

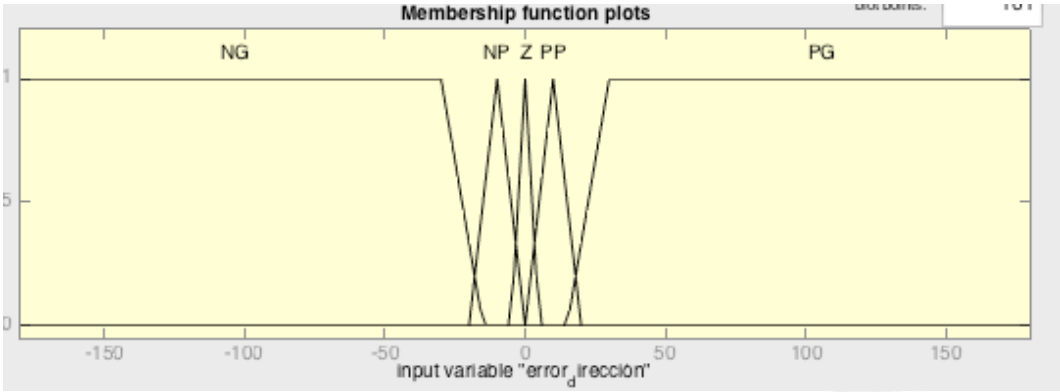


Figura 33. Funciones de pertenencia del error en el control de dirección

A continuación se muestran los rangos de los conjuntos de la variación del error de dirección en la Tabla 9 y las funciones de pertenencia en la Figura 34.

Conjunto	Tipo de función	Extremos	Vértice
NG	Trapezoidal	-360, -30	-60
NP	Triangular	-40, 0	-20
Z	Triangular	-10, 10	0
PP	Triangular	0, 40	20
PG	Trapezoidal	30, 360	60

Tabla 9. Rangos de los conjuntos de la variación del error en el control de dirección

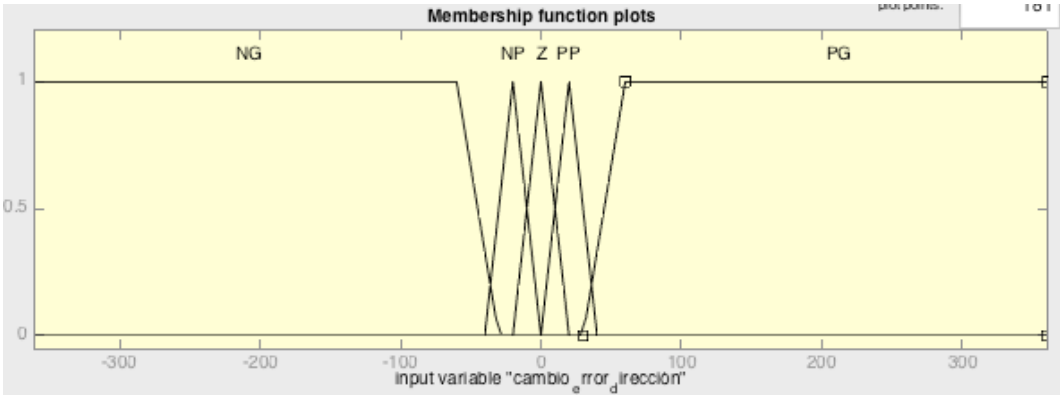


Figura 34. Funciones de pertenencia de la variación del error en el control de dirección

Con las variables de entrada definidas se pasa a asignar los rangos y funciones de pertenencia de la variable de salida, la cantidad de giro, que al final se traduce en una señal PWM que regula la potencia que recibe el motor eléctrico de dirección asistida del quad. Como no se conocía a priori el comportamiento de este motor cuando el quad está en movimiento se llevó a cabo una prueba en la que se envío una señal escalonada (ver Figura 35) a la tarjeta de dirección con un ancho de pulso cambiante y se midió el giro que provocaba si la señal estaba activa cinco segundos. En la Figura 36 se muestra la variación del ángulo medido por la IMU.

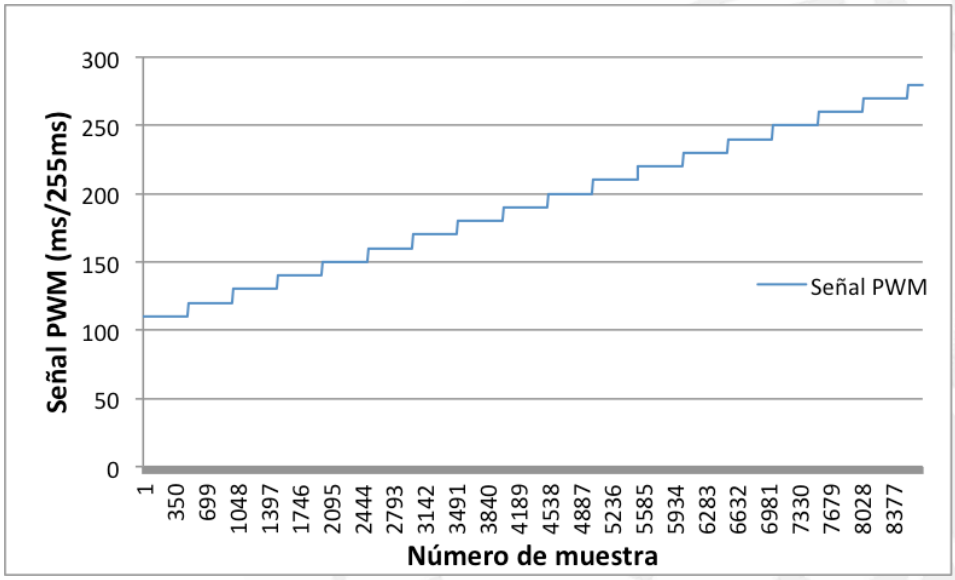


Figura 35. Señal PWM escalonada

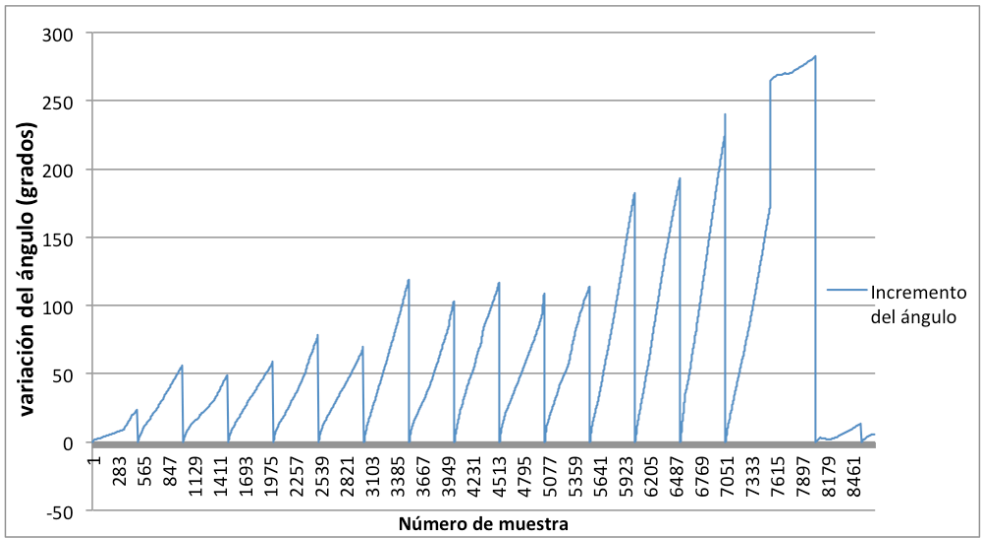


Figura 36. Variación del ángulo girado por el eje de dirección

Tomando como referencia de la cantidad de giro que producen las distintas señales PWM se establecen los rangos de los conjuntos de la variable de salida cantidad de giro, ya que la otra variable de salida, el sentido del giro, está implícita en el signo de la cantidad de giro. Sus funciones de pertenencia se muestran en la Figura 37.

Conjunto	Tipo de función	Extremos	Vértice
NG	Triangular	-220, -120	-170
NP	Triangular	--140, -80	-110
Z	Triangular	-80, 80	0
PP	Triangular	80, 140	110
PG	Triangular	220, 120	170

Tabla 10. Rangos de los conjuntos borrosos de la salida del control de dirección

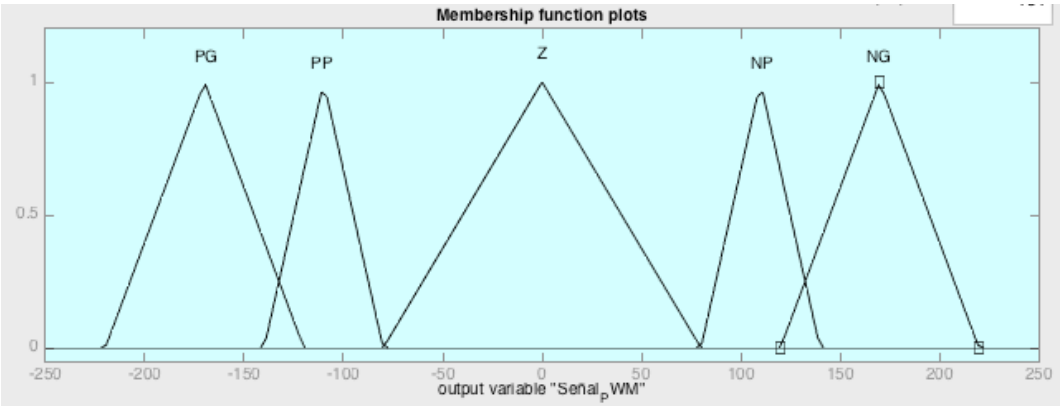


Figura 37. Funciones de pertenencia de la cantidad de giro

Finalmente se definen las relaciones entre las distintas combinaciones de los conjuntos de las variables de entrada con los conjuntos de la variable de salida mediante las reglas borroso que se muestran en la Tabla 11

	Error					
Variación del error		NG	NP	Z	PP	PG
	NG	NG	NG	NP	NP	Z
	NP	NG	NP	NP	Z	PP
	Z	NP	NP	Z	PP	PP
	PP	NP	Z	PP	PP	PG
	PG	Z	PP	PP	PG	PG

Tabla 11. Reglas del control de dirección

Capítulo 3 RESULTADOS/EXPERIMENTOS

Como ya se explicó en la sección 1.1.2 (pág. 10) el control borroso se basa en el modo de operación de un experto para determinar las variables, los conjuntos borrosos y las reglas. Es muy recomendable, casi siempre necesario, probar el comportamiento del control diseñado y ajustar los valores y reglas que se habían definido en el diseño para que el comportamiento del sistema se adecúe más al deseado.

Por esta razón y para comprobar el funcionamiento de los distintos bloques de control del quad se han llevado a cabo las pruebas que se detallan a continuación.

3.1 RESULTADOS DEL CONTROL DE VELOCIDAD

Partiendo de la información comentada en la sección 2.7.2 (pág. 40) se empezaron a diseñar e implementar controles borrosos de velocidad en el quad programados en Arduino. Con los controles se realizaron pruebas en la pista que se muestra en la Figura 38 y se fueron ajustando parámetros del control.

Figura 38. Imagen de la pista sobre la que se han realizado las pruebas

Tras varias pruebas y por motivos de seguridad se decidió limitar el ángulo máximo que puede girar el servo, evitando acelerones bruscos que pueden ser peligrosos. En un principio se pensó que era bueno hacer que el incremento del ángulo fuese menor que 1 para hacer que las aceleraciones fuesen más suaves. Además, se decidió limitar el ángulo máximo de giro a 15º. El resultado de esta prueba se muestra en la Figura 39 y los valores que toman las variables del control borroso en la Figura 40.

Lo que se puede extraer de esta prueba es que la aceleración inicial es demasiado grande y por ello justo después de alcanzar la velocidad hay un sobrepaso e inmediatamente la velocidad baja mucho. Esto sugiere que la limitación del ángulo máximo del servo tiene que ser menor que 15º. Además, también parece recomendable ajustar las funciones de pertenencia de los conjuntos de las variables de entrada.

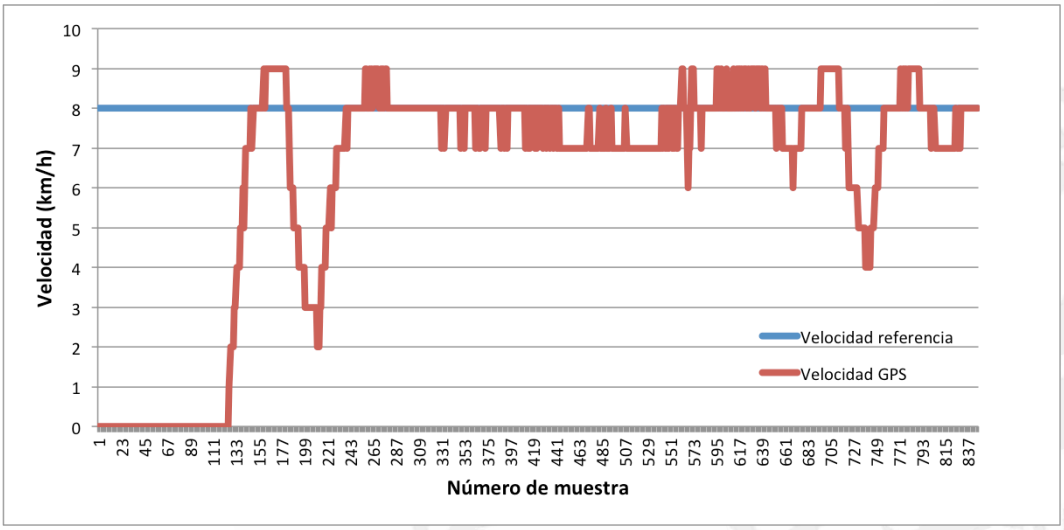


Figura 39. Seguimiento de velocidad con ángulo limitado a 15

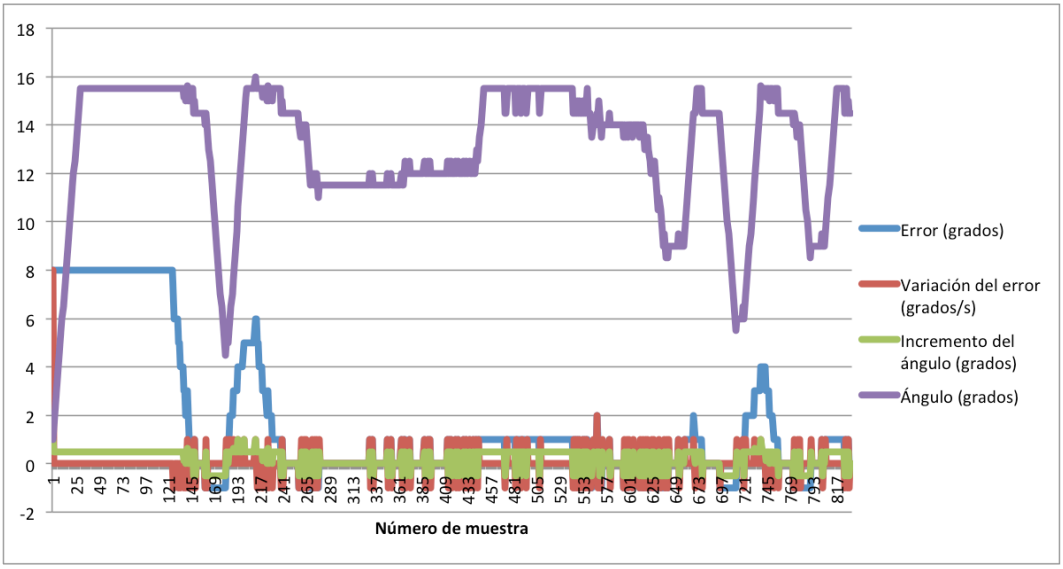


Figura 40. Variables de control con ángulo limitado a 15

En la prueba anterior se ha establecido que hay que limitar el ángulo máximo a un valor inferior a 15. Por ello en esta prueba se va a limitar el ángulo a 13º y se ajustan las funciones de pertenencia de los conjuntos de las variables de entrada. Por otro lado, se mantienen los valores de los conjuntos del incremento del ángulo. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 41 y los valores que toman las variables del control en la Figura 42. Los resultados obtenidos en esta prueba muestran un alcance más suave y estable de la velocidad de referencia pero después de un tiempo la velocidad no se mantiene estable.

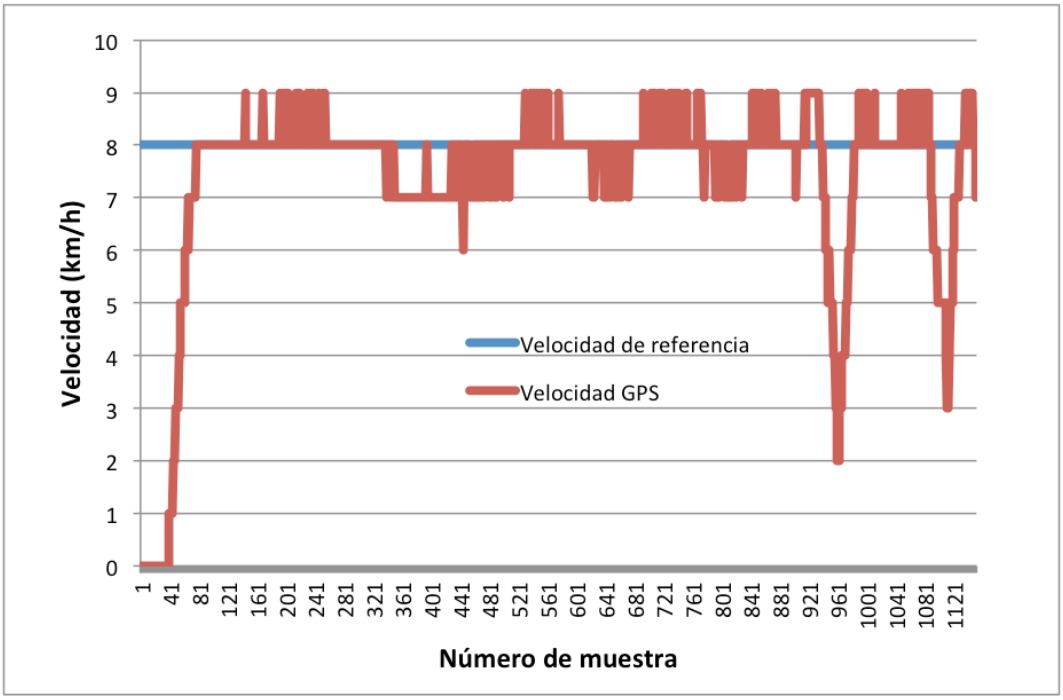


Figura 41 Seguimiento de velocidad con ángulo limitado a 13

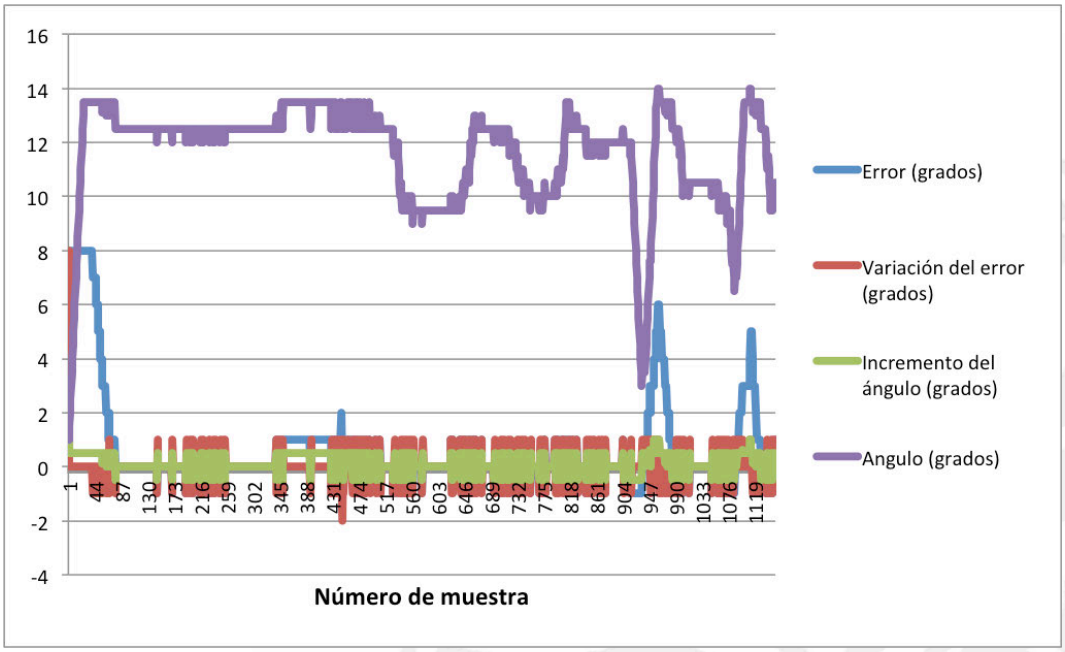


Figura 42. Variables de control con ángulo limitado a 13

Buscando mejorar el comportamiento del control se vuelven a ajustar las funciones de pertenencia de los conjuntos de las variables de entrada, estableciendo que el conjunto de error nulo vaya de -1 a 1. Además, se incrementa

el ángulo máximo a 14 grados y se establece que el incremento pequeño esté centrado en 1 en vez de en 0.5. El comportamiento del vehículo se puede observar en la Figura 43 y los valores de las variables de control en la Figura 44. En este caso se puede ver que la velocidad de referencia se alcanza sin un gran sobrepaso y que después se mantiene muy estable entre 7, 8 y 9 km/h (la mayor parte del tiempo en 8 km/h) con algún momento puntual en el que la velocidad desciende a los 6 km/h.

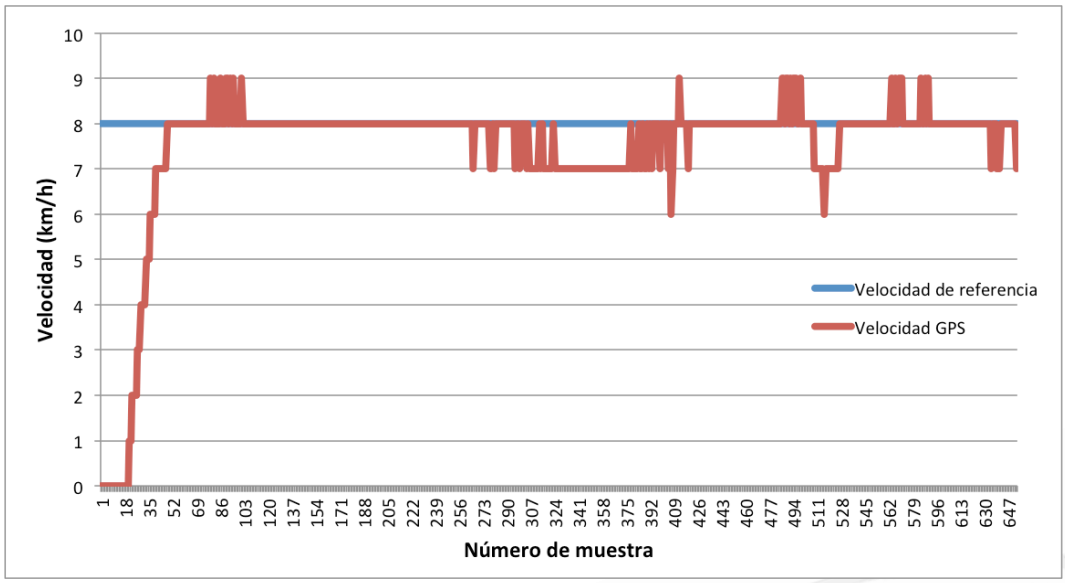


Figura 43. Seguimiento de velocidad con ángulo limitado a 14 e incremento pequeño 1

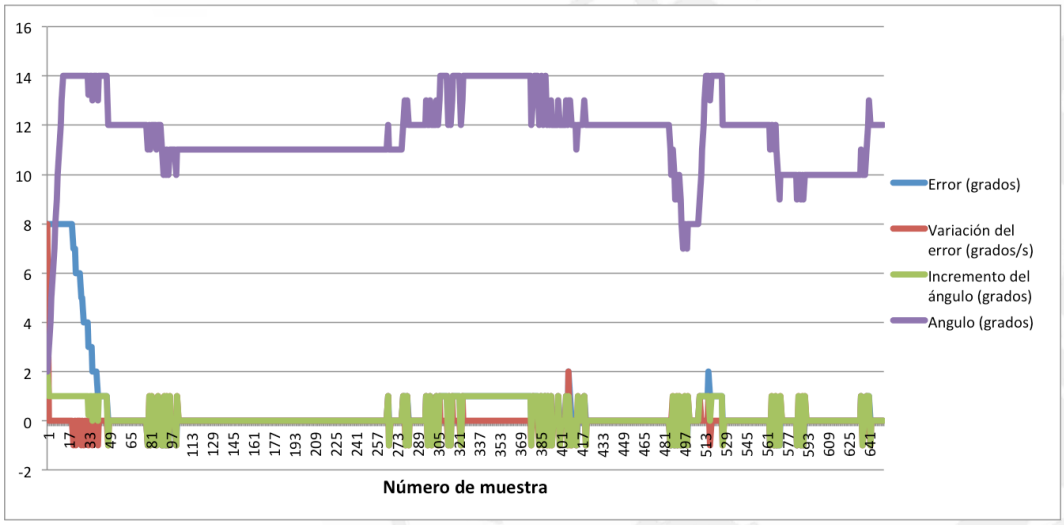


Figura 44. Variables de control con ángulo limitado a 14 e incremento pequeño 1

Viendo que este control daba buenos resultados se decidió llevar a cabo una prueba el la que la velocidad de referencia se envió vía WiFi desde el ordenador del operador. En la Figura 45 se puede apreciar el comportamiento del vehículo cuando la velocidad de referencia va cambiando. Esta prueba tiene menos muestras porque la duración fue menor, ya que al separarse más de 30 m del operario se perdió la conexión. Sin embargo se observa que sigue, con cierto retardo, correctamente la velocidad de referencia.

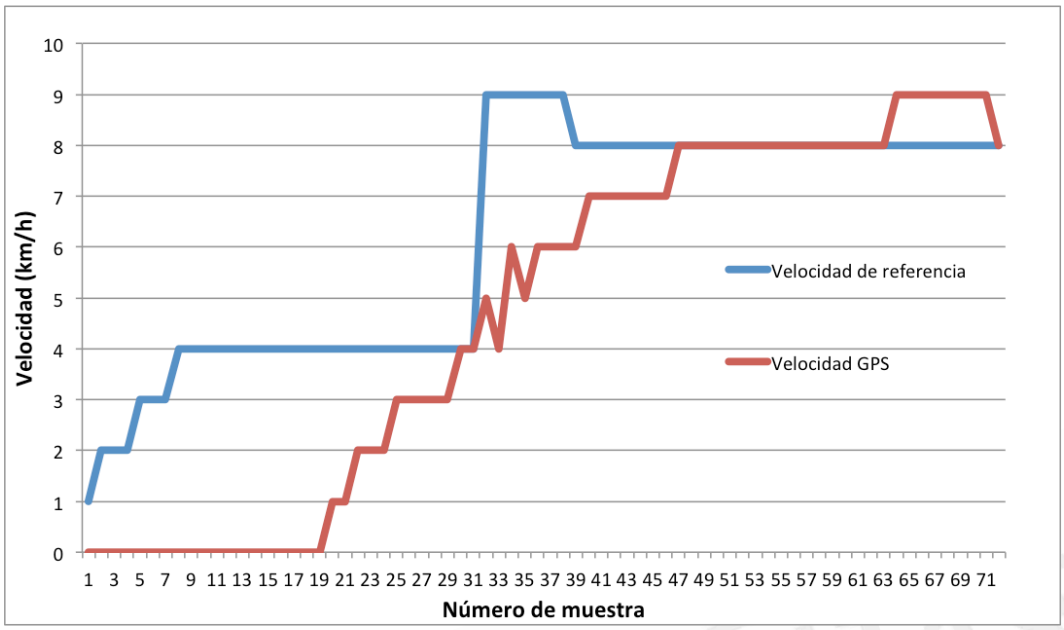


Figura 45.Seguimiento de la velocidad de referencia enviada desde el ordenador del operario vía WiFi

3.2 RESULTADOS DEL CONTROL DE DIRECCIÓN

Después del control de velocidad se llevaron a cabo pruebas para comprobar el funcionamiento del control de dirección. Para este control se llevaron a cabo dos pruebas distintas. En la primera se orientó el quad con un ángulo cercano a 0º y se introdujo un ángulo de referencia 160º menor que el ángulo de orientación inicial del quad. En la Figura 46 se pueden identificar 3 fases. En la fase I, el quad aún no es capaz de girar mucho porque está en reposo y no puede ejercer un par

suficiente como para orientar el eje hacia el ángulo de referencia. Una vez se pone en movimiento (fase II) el quad se va orientando hasta llegar al ángulo de referencia. En la fase III el quad intenta mantener la orientación corrigiendo las variaciones introducidas por el terreno irregular, ya que esta vez no se ha hecho la prueba sobre asfalto sino en el campo.

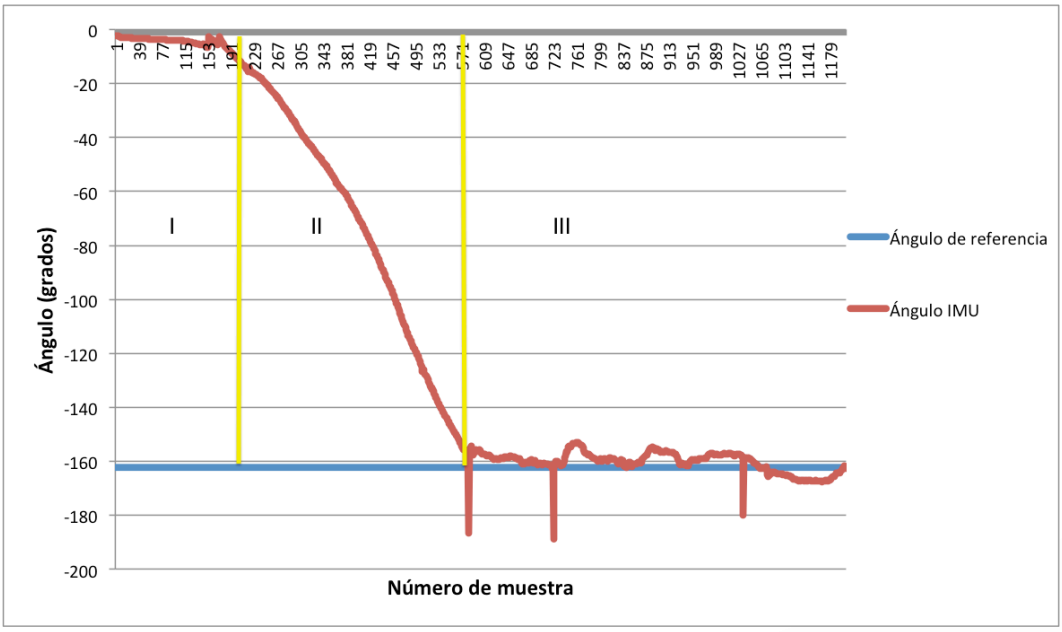


Figura 46. Seguimiento de un ángulo de referencia 160º menor

La segunda prueba consistió en dejar que el quad se orientase y una vez orientado cambiar la dirección del eje manualmente para comprobar la respuesta ante perturbaciones grandes y distintas de las introducidas por las irregularidades del terreno. En esta prueba se distinguen dos tipos de fases (ver Figura 47). Por un lado están las fases I, III, V y VII en las que se observa cómo el sistema de control de dirección corrige el ángulo del eje hasta que la diferencia entre el ángulo de referencia y el del eje se acerca a 0. Por otro lado están las fases II, IV y VI que corresponden a zonas de recuperación en las que se había girado manualmente el manillar para comprobar la capacidad de recuperación del sistema ante cambios grandes.

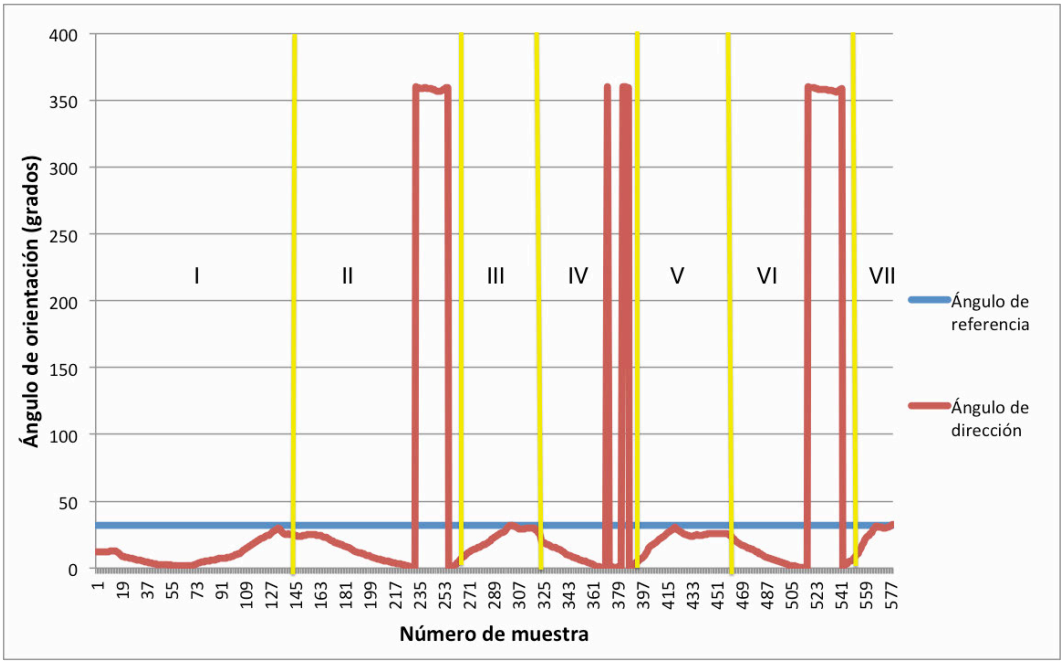


Figura 47. Seguimiento de un ángulo de referencia frente a grandes perturbaciones

3.3 RESULTADOS DEL FRENO

En el caso del freno se llevó a cabo un experimento para comprobar la capacidad de frenada del vehículo. La prueba consistió en, una vez llegados a 8 km/h, dejar de acelerar (acelerador a 0º) y activar el sistema de freno durante dos segundos, esperar 2 segundos y volver a acelerar. Lo que se observó es que el sistema de frenado ayuda a disminuir la velocidad rápidamente pero el pero no detiene completamente el movimiento del quad.

Para cuantificar la fuerza adicional que necesita el actuador lineal para lograr un frenado brusco se probó en parado el sistema, activando el freno y empujando el quad. Llegó un momento en el que, por la fuerza adicional ejercida sobre el freno, no era posible mover el sistema entre varias personas. Para ejercer la fuerza sobre el freno se utilizó un dinamómetro de manera que se pudiese obtener el valor de la fuerza ejercida, siendo este valor 0.5 kg.

Capítulo 4 CONCLUSIONES

Respondiendo a la necesidad de contar con un quad que pueda llevar a cabo de modo autónomo la inspección de cultivos se han desarrollado e integrado sistemas que permiten el control de velocidad y dirección de un quad y que pueden ser instalados en distintos modelos, siempre y cuando cuenten con dirección asistida eléctrica. Además, a partir de los resultados obtenidos se pueden sacar las siguientes conclusiones.

En primer lugar, se ha demostrado que se puede controlar la dirección del quad utilizando el sistema de dirección asistida eléctrica. Además, se ha medido la relación existente entre las señales de entrada de dicho sistema y el giro que provocan en el eje de dirección.

También se ha demostrado que con pocos sensores, una IMU no muy cara y un receptor GPS, es posible conocer el estado de las variables de velocidad y dirección con una precisión suficiente como para controlar la navegación de un quad. Asimismo, se ha conseguido enviar al vehículo instrucciones de navegación de forma inalámbrica.

Finalmente, se ha conseguido que el vehículo siga las instrucciones de navegación pudiendo controlar tanto la velocidad como la dirección del mismo. Esto puede permitir que se incorporen sistemas de guiado que permitan automatizar la labor de inspección, crucial si se quiere seguir un sistema de agricultura de precisión.

Por lo tanto, se trata de un proyecto con un gran potencial de desarrollo y de impacto en los sistemas de producción agrícolas ya que puede facilitar mucho el control de plagas y enfermedades y mejorar la eficiencia del tratamiento de los cultivos.

Capítulo 5 FUTUROS DESARROLLOS

Como el título de este proyecto indica, lo que se ha realizado es una puesta a punto del quad para que se puedan instalar sistemas de guiado por visión artificial y los sistemas de inspección de cultivos. Por lo tanto, los futuros desarrollos irán encaminados a perfeccionar los sistemas ya instalados y a incorporar los equipos que permitan el objetivo final del proyecto.

Dentro de las mejoras que se pueden hacer a los sistemas están las relacionadas con la medida del ángulo girado por el eje de dirección, el teleoperado y la fuerza del sistema de frenado. El problema de la medida del ángulo es que la precisión de la IMU en la medida de ángulos se ve afectada por las vibraciones del vehículo. En la navegación autónoma muchos proyectos utilizan encoders solidarios al eje de dirección para medir el ángulo girado y ésta podría ser una solución al problema.

En cuanto al teleoperado, el principal problema es el alcance de la red WiFi y esto se puede solventar instalando repetidores WiFi en distintas zonas del cultivo o desarrollar otro sistema con un alcance mayor como puede ser el teleoperado por radiofrecuencia. Otra posibilidad es la comunicación con un servicio de datos (Internet) a través de movistar.

Asimismo lo que se va buscando no es la teleoperación si no la navegación autónoma. En ese caso el ordenador de a bordo del quad recibiría el plan y la comunicación del quad durante la ejecución del plan sería para monitorizar/supervisar la misión.

Finalmente, la mejora del sistema de frenado pasa por encontrar un actuador lineal que tenga una velocidad de reacción similar a la del solenoide pero con una fuerza mayor. Otra solución es acoplar otro actuador igual al ya instalado de forma que entre los dos ejerzan una fuerza suficiente. Esta solución parece la más sencilla y

barata ya que la fuerza adicional que necesita el sistema actual para realizar adecuadamente la frenada es pequeña.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Real Academia Española. *Diccionario de la lengua española (22ª ed*.) Madrid, España; 2001

[2] Ma, Q., Chen, Q., Shang, Q., & Zhang, C. (2006, July). The Data Acquisition for Precision Agriculture Based on Remote Sensing. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2006. IGARSS 2006. IEEE International Conference on*(pp. 888-891). IEEE.

[3] Reid, J. F. (2011). The impact of mechanization on agriculture. *Bridge*, *41*(3), 22-29.

[4] Emmi, L., Gonzalez-de-Soto, M., Pajares, G., & Gonzalez-de-Santos, P. (2014). Integrating sensory/actuation systems in agricultural vehicles. *Sensors*,*14*(3), 4014-4049.

[5] Morales, Y., & Tsubouchi, T. (2007, March). DGPS, RTK-GPS and StarFire DGPS performance under tree shading environments. In *Integration Technology, 2007. ICIT'07. IEEE International Conference on* (pp. 519-524). IEEE.

[6] O'Connor, M., Bell, T., Elkaim, G., & Parkinson, B. (1996). Automatic steering of farm vehicles using GPS. *Precision Agriculture*, (precisionagricu3), 767-777.

[7] Bengochea-Guevara, J.M.; Burgos-Artizzu, X.P.; Ribeiro, A. *Real-time image processing for crop/weed discrimination in wide-row crops.* In proceedings of RHEA; 2014; pp. 477-488.

[8] Bergerman, M., Maeta, S. M., Zhang, J., Freitas, G. M., Hamner, B., Singh, S., & Kantor, G. (2015). Robot Farmers: Autonomous Orchard Vehicles Help Tree Fruit Production. *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, *22*(1), 54-63.

[9] Ang, K. H., Chong, G., & Li, Y. (2005). PID control system analysis, design, and technology. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, *13*(4), 559-576.

[10] Zadeh, L. A. (1996). Nacimiento y evolución de la lógica borrosa, el soft computing y la computación con palabras: un punto de vista personal.*Psicothema*, *8*(2), 421-429.

[11] Zadeh, L. A. (1996). Fuzzy logic= computing with words. *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on*, *4*(2), 103-111.

[12] Mathworks. Fuzzy Logic Toolbox – Matlab. Página web: http://es.mathworks.com/products/fuzzy-logic/

[13] Ozek, M. B., & Akpolat, Z. H. (2008). A software tool: Type-2 fuzzy logic toolbox. *Computer Applications in Engineering Education*, *16*(2), 137-146.

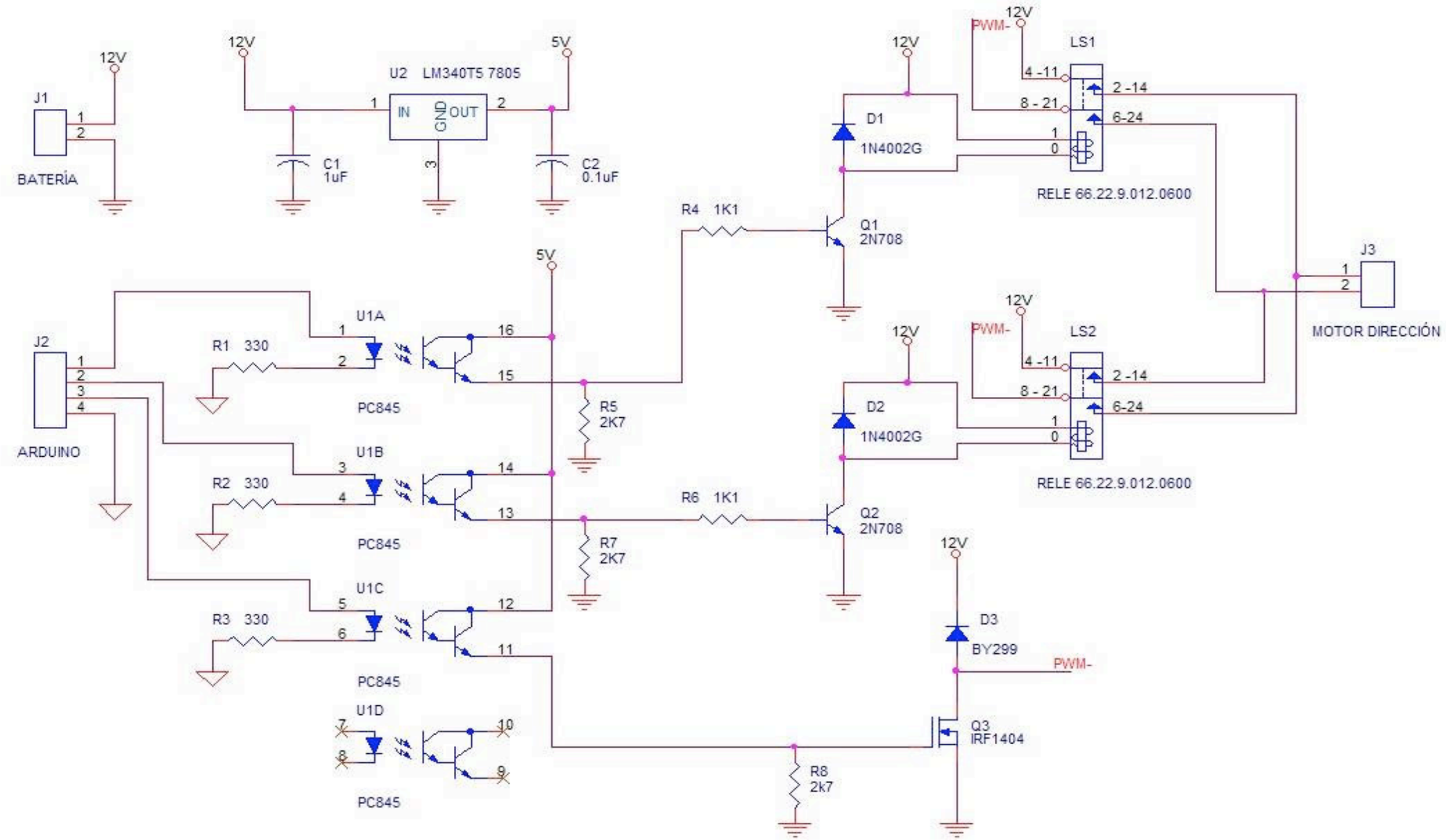
[14] Cortner, A., Conrad, J. M., & BouSaba, N. (2012, March). Autonomous all-terrain vehicle steering. In *Southeastcon, 2012 Proceedings of IEEE* (pp. 1-5). IEEE.

[15] McKinney, R., Zapata, M. J., Conrad, J. M., Meiswinkel, T. W., & Ahuja, S. (2010, March). Components of an autonomous all-terrain vehicle. In *IEEE SoutheastCon 2010 (SoutheastCon), Proceedings of the* (pp. 416-419). IEEE.

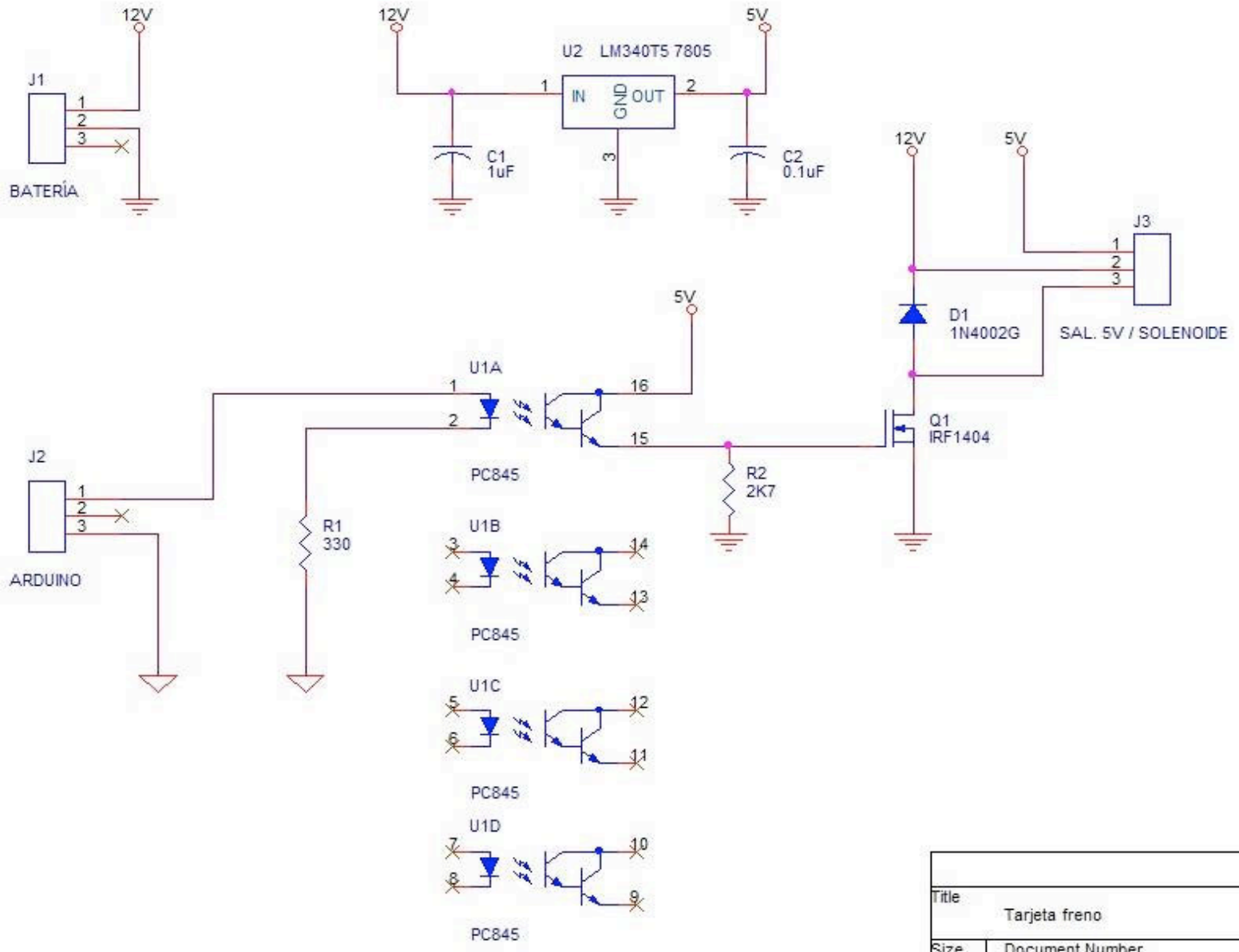
[16] Semiconductors, P. (2000). The I2C-bus specification. *Philips Semiconductors*,*9397*(750), 00954.

[17] Garcıa-Alegre, M. C. (1991). Inteligencia Artificial en el Control de Procesos: controladores borrosos. *Mundo Electrónico*, *214*, 42-49.

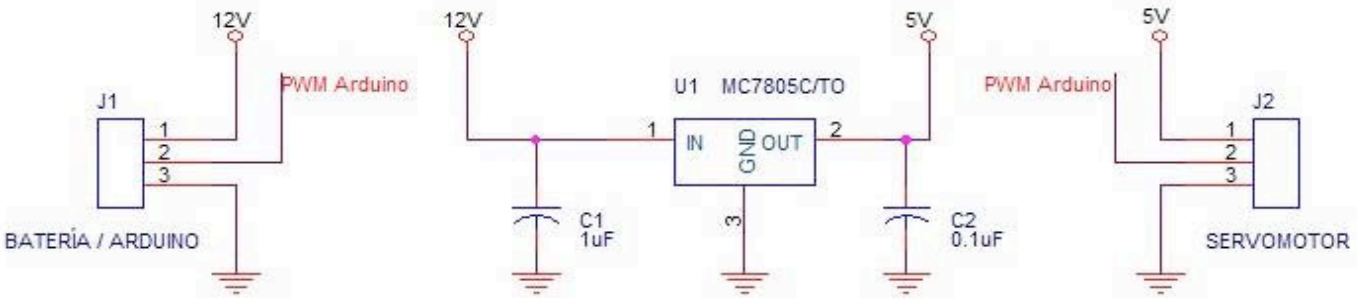
Parte II PLANOS



Title	Tarjeta motor dirección		
Size A	Document Number 1		Rev 0
Date: Thursday, May 28, 2015	Sheet 1 of 1		



Title	Tarjeta freno	
Size A	Document Number 1	Rev 0
Date: Thursday, May 28, 2015	Sheet 1 of 1	



Title: Tarjeta acelerador		
Size: A	Document Number: 1	Rev: 1
Date: Tuesday, May 26, 2015	Sheet 1 of 1	

Parte III ESTUDIO

ECONÓMICO

Capítulo 1 ESTUDIO ECONÓMICO

A la hora de llevar a cabo el estudio económico de este proyecto es de capital importancia tener en cuenta el impacto que podría llegar a producir la implantación del sistema que se ha diseñado.

En la actualidad, las explotaciones agrícolas utilizan un sistema extensivo en el que se dedican grandes superficies de terreno a un único cultivo y se aplica un tratamiento uniforme en todo el cultivo. Esto hace que se aplique exceso de producto en zonas que no necesitan tanto y que las zonas que necesitan una dosis superior no reciban el tratamiento que necesitan.

Como respuesta a esta gestión de los cultivos surge lo que se conoce como agricultura de precisión que busca tratar el cultivo teniendo en cuenta la variabilidad del mismo y aumentando el rendimiento de las cosechas. Para poder cumplir con los preceptos de la agricultura de precisión es necesario tener un conocimiento previo del estado del cultivo y contar con unos mapas de distribución de enfermedades y plagas. Esto se consigue mediante la inspección del cultivo que, en la actualidad, la realizan operarios en momentos clave, aunque la automatización de esta tarea para que se realice con un vehículo autónomo puede conducir, en un futuro, a una inspección más rápida, barata y efectiva.

Las principales claves económicas de este proyecto son:

- El sistema debe ser implantable en distintos modelos de quad con unas características mínimas (dirección asistida eléctrica) que suelen ser utilizados para la labor de inspección. Esto hace que no haya un coste fijo muy grande al no tener que adquirir un vehículo nuevo.
- La automatización de la inspección aumentaría la rapidez, eficiencia y precisión del proceso lo que podría traducirse en un mayor rendimiento en los cultivos.

- Los efectos de plagas y enfermedades en los cultivos puede llegar a ser tan destructiva que, en algunos casos, impide aprovechamiento alguno del cultivo. Es más, las pérdidas derivadas de las plagas y enfermedades hacen que se pierda un porcentaje considerable de la producción agraria mundial.

Con todo esto se puede concluir que este proyecto es económicamente atractivo al reducir costes en la inspección del cultivo, aumentar el rendimiento del cultivo pudiendo aplicar las dosis necesarias de producto en cada zona y al ayudar a prevenir y tratar enfermedades y plagas que pueden llegar a tener efectos devastadores.

Parte IV PRESUPUESTO

Capítulo 1 MEDICIONES

1.1 COMPONENTES PRINCIPALES

Componentes	**Cantidad**
Arduino UNO	1
IMU MPU 6050	1
Regulador de tensión L7805CT	1
Regulador de tensión MC7805CT	1
Relés	2
Condensadores	6
Diodo BY299	1
Diodo 1N4002G	3
Transistores MOSFET RF1404	2
Transistores BJT 2N708	2
Optacopladores PC815	2
Servomotor Futaba	1
Solenoide lineal	1
Resistencias	10

Cable	6 m
Placas board	3

Tabla 12. Relación de componentes

1.2 EQUIPO Y HERRAMIENTAS

Componentes	***Cantidad***	***Horas de proyecto***	***Horas de uso al año***
Ordenador	2	400	1000
Receptor GPS Hemisphere R220	1	100	600
Antena GPS	1	100	600
Equipo de soldadura	1	5	20
Polímetro	1	1	5
Batería 12 V 18Ah	1	50	100
Batería 12V 4Ah	1	40	100

Tabla 13. Relación de equipos y herramientas

1.3 SOFTWARE

Programa	***Horas de proyecto***	***Horas de uso al año***
Arduino IDE	400	800
Matlab	30	200

Microsoft Office	150	500
OrCad	10	60
Compare	30	60

Tabla 14. Relación de herramientas de software

1.4 MANO DE OBRA DIRECTA

Actividad	***Horas***
Programación	400
Soldadura y montaje	10
Cálculos y diseños mecánicos	5
Pruebas y solución de problemas	120
Documentación	80

Tabla 15. Relación de horas de mano de obra

Capítulo 2 PRECIO UNITARIOS

2.1 COMPONENTES PRINCIPALES

Componentes	*Precio (€/unidad)*
Arduino UNO	20,00
IMU MPU 6050	5,50
Regulador de tensión L7805CT	3,30
Regulador de tensión MC7805CT	0,43
Relés	14,48
Condensadores	0,05
Diodo BY299	1,39
Diodo 1N4002G	0,139
Transistores MOSFET RF1404	2,795
Transistores BJT 2N708	5,98
Optacopladores PC815	3,00
Servomotor Futaba	50,82
Solenoide lineal	50,09

Resistencias	0,138
Cable	0,05
Placas board	4,08

Tabla 16. Precio unitario de componentes principales

2.2 EQUIPO Y HERRAMIENTAS

Componentes	**Precio (€/unidad)**
Ordenador	550,00
Receptor GPS Hemisphere R220	5000
Antena GPS	150
Equipo de soldadura	22,00
Polímetro	39,90
Batería 12 V 18Ah	43,12
Batería 12V 4Ah	10,43

Tabla 17. Precio unitario del equipo y herramientas

2.3 SOFTWARE

Programa	**Precio (€/unidad)**
Arduino IDE	Libre
Matlab	2000,00
Microsoft Office	69,00

OrCad	2985,00
Compare	Libre

Tabla 18. Precio unitario del software

2.4 MANO DE OBRA DIRECTA

Actividad	**Precio (€/hora)**
Programación	25,00
Soldadura y montaje	20,00
Cálculos y diseños mecánicos	25,00
Pruebas y solución de problemas	30,00
Documentación	40,00

Tabla 19. Coste unitario de mano de obra

Capítulo 3 SUMAS PARCIALES

3.1 COMPONENTES PRINCIPALES

Componentes	Cantidad	Precio (€/unidad)	Coste total (€)
Arduino UNO	1	24,2	24,2
IMU MPU 6050	1	6,66	6,66
Regulador de tensión L7805CT	1	4,00	4,00
Regulador de tensión MC7805CT	1	0,53	0,53
Relés	2	17,53	35,05
Condensadores	6	0,07	0,37
Diodo BY299	1	1,69	1,69
Diodo 1N4002G	3	0,17	0,51
Transistores MOSFET RF1404	2	3,39	6,77
Transistores BJT 2N708	2	7,24	14,47
Optacopladores PC815	2	3,00	6,00
Futaba S3102	1	50,82	50,82

Sumas parciales

Solenoide lineal	1	50,09	50,09
Resistencias	10	0,17	1,38
Cable	6 m	0,07	0,3
Placas board	3	4,94	12,24
Total			217,94

Tabla 20. Coste total de componentes principales

3.2 EQUIPO Y HERRAMIENTAS

Componentes	**Precio (€/unidad)**	**Horas de proyecto**	**Horas de uso al año**	**Amortización anual**	**Coste total (€)**
Ordenador	550,00	400	1000	15%	66
Receptor GPS Hemisphere R220	5000	100	600	15%	125
Antena GPS	150	100	600	15%	3,75
Equipo de soldadura	22,00	5	20	15%	0,83
Polímetro	39,90	1	5	15%	1,20

Batería 12 V 18Ah	52,18	50	100	15%	3,92
Batería 12V 4Ah	12,63	40	100	15%	0,76
Total					201,45

Tabla 21. Coste toal del equipo y herramientas

3.3 SOFTWARE

Programa	**Horas de proyecto**	**Horas de uso al año**	**Precio (€/unidad)**	**Amortización anual**	**Coste total (€)**
Arduino IDE	400	800	Libre	-	0
Matlab	30	200	2000,00	15%	300
Microsoft Office	150	500	69,00	15%	20,7
OrCad	10	60	2985,00	15%	497,5
Compare	30	60	Libre	-	0
Total					818,2

Tabla 22. Coste total del software

3.4 MANO DE OBRA DIRECTA

Actividad	Precio (€/hora)	Horas	Coste total (€)
Programación	25,00	100	2500,00
Soldadura y montaje	15,00	10	150,00
Cálculos y diseños mecánicos	25,00	5	125,00
Pruebas y solución de problemas	30,00	40	1200,00
Documentación	35,00	100	3500,00
Total			7475,00

Tabla 23. Coste total de mano de obra

Capítulo 4 PRESUPUESTO GENERAL

A partir de la suma de las categorías anteriores se obtiene el coste presupuestado del proyecto cuyo importe se muestra en la Tabla 24.

Concepto	**Coste (€)**
Componentes principales	217,94
Equipo y herramientas	201,45
Software	818,2
Mano de obra	7475,00
Total	8712,59

Tabla 24. Presupuesto general

Parte V MANUAL DE USUARIO

Capítulo 1 CONEXIONES

1.1 INTRODUCCIÓN

Este primer capítulo del Manual de usuario se parte de un sistema que aún no está montado y en él se detallan la manera en la que hay que realizar las conexiones. Por lo tanto, si las conexiones ya han sido efectuadas y se han montado las distintas partes del equipo se puede pasar directamente al Arranque del sistema.

1.2 ALIMENTACIÓN DE LOS COMPONENTES

Todos los equipos del sistema necesitan estar alimentados para funcionar y se alimentan de formas variadas. Por un lado, el ordenador portátil de exteriores que se utiliza se alimenta con la batería interna que tiene y ésta debe estar cargada para que funcione. La placa Arduino se alimenta vía USB conectada al ordenador ya que se necesita esta conexión para la transferencia de datos de ambos equipos. Por otro lado, el resto de equipos se alimentan desde las dos baterías de 12 V que se utilizan. El receptor GPS se alimenta directamente desde la batería de 12 V y 4 Ah mientras que las tarjetas electrónicas que controlan las señales que llegan a los actuadores se alimentan desde la batería de 12 V y 18 Ah .

Además, el módulo de almacenamiento en una tarjeta SD y la IMU y la brújula se alimentan desde las salidas de la Arduino: el módulo a 3.3V y la IMU y brújula a 5V.

1.3 CONEXIONES ENTRE LOS COMPONENTES

Una vez se ha explicado la alimentación de los equipos se puede explicar la manera en la que se tienen conectar los distintos bloques que forman el sistema. Uno de los aspectos más importantes de esta parte es la escasez de puertos USB del ordenador que se ha solucionado conectando un multiplicador de puertos USB a uno de los dos puertos que el ordenador tiene disponibles.

1.3.1 CONEXIONES DEL ORDENADOR

El ordenador está conectado vía USB a los siguientes dispositivos:

- 1ª señal del receptor GPS
- Multiplicador de puertos USB. Este dispositivo permite la conexión USB entre el ordenador y los siguientes dispositivos:
    - 2ª señal del receptor GPS. Esta señal sale del PORTB del receptor en protocolo serie RS232 y con un adaptador intermedio RS232-USB se conecta a un puerto USB del multiplicador.
    - Arduino. Esta conexión sirve tanto para cargar los programas al microcontrolador como para la transmisión de información entre los dos dispositivos y la alimentación del microcontrolador.
    - Módulo de cobertura de internet vía USB.
    - Lector de tarjetas. Como el ordenador no tiene un puerto para leer tarjetas se necesita conectar este dispositivo cuando se quiere extraer los datos de la tarjeta SD.

1.3.2 CONEXIONES DE LA TARJETA ARDUINO Y LAS TARJETAS

Las conexiones de la tarjeta Arduino son las siguientes:

- Tarjeta SD:
    - 3.3 V al pin de 3.3 V
    - GND a la GND
    - CS (Chip Select) al pin 10
    - MISO al pin 11
    - MOSI al pin 12
    - CLK al pin 13
- Tarjeta del acelerador (ver Figura 48).
    - Entradas
        - 12 V al positivo de la batería de 12 V y 18 Ah
        - GND al negativo de la batería de 12 V y 18 Ah
        - GND a la GND de la Arduino
        - PWM (cable verde) al pin 9
    - Salidas:
        - Positivo al positivo del servomotor (cable rojo)
        - Negativo al negativo del servomotor (cable negro)
        - PWM (cable azul) al cable de entrada PWM (cable blanco)

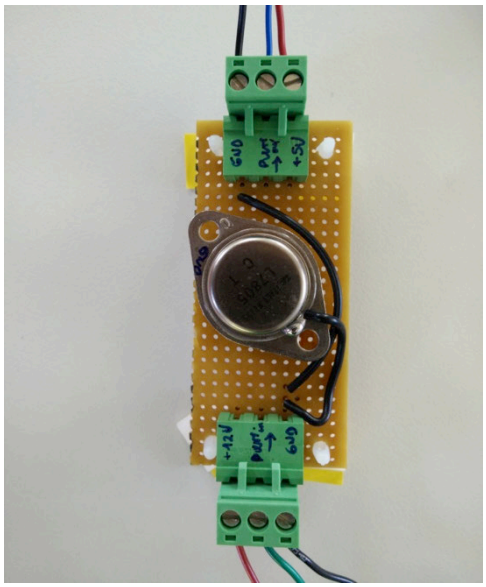


Figura 48. Conexiones de la tarjeta del acelerador

- Tarjeta de dirección (ver Figura 49).
    - Entradas
        - I1 al pin 7
        - I2 al pin 8
        - PWM al pin 6
        - GND a la GND del Arduino
        - Positivo al positivo de la batería de 12 V y 18 Ah
        - Negativo al negativo de la batería de 12 V y 18 Ah
    - Salidas
        - Positivo al positivo del motor de dirección asistida (cable rojo)
        - Negativo al negativo del motor de dirección asistida (cable negro)

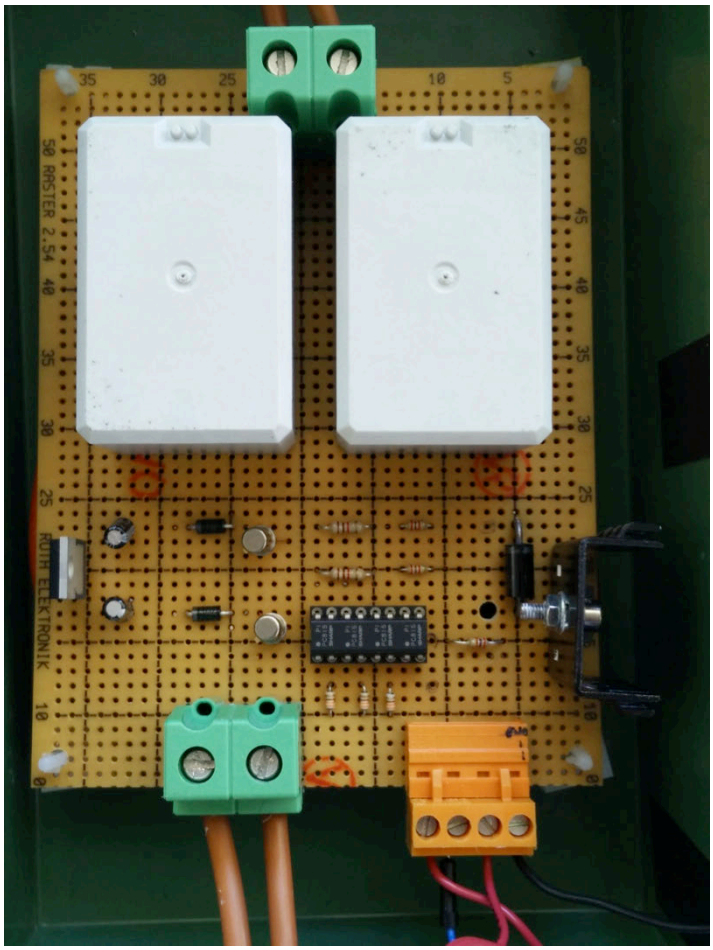


Figura 49. Conexiones de la tarjeta de dirección

- Tarjeta de freno
    - Entradas
        - Positivo al positivo de la batería de 12 V y 18 Ah
        - Negativo al negativo de la batería de 12 V y 18 Ah
        - Activación del freno al pin 4
    - Salidas. El positivo y negativo de la salida de la tarjeta se pueden conectar a cualquiera de los dos cables de entrada al solenoide siempre y cuando estén conectados cada uno a uno.

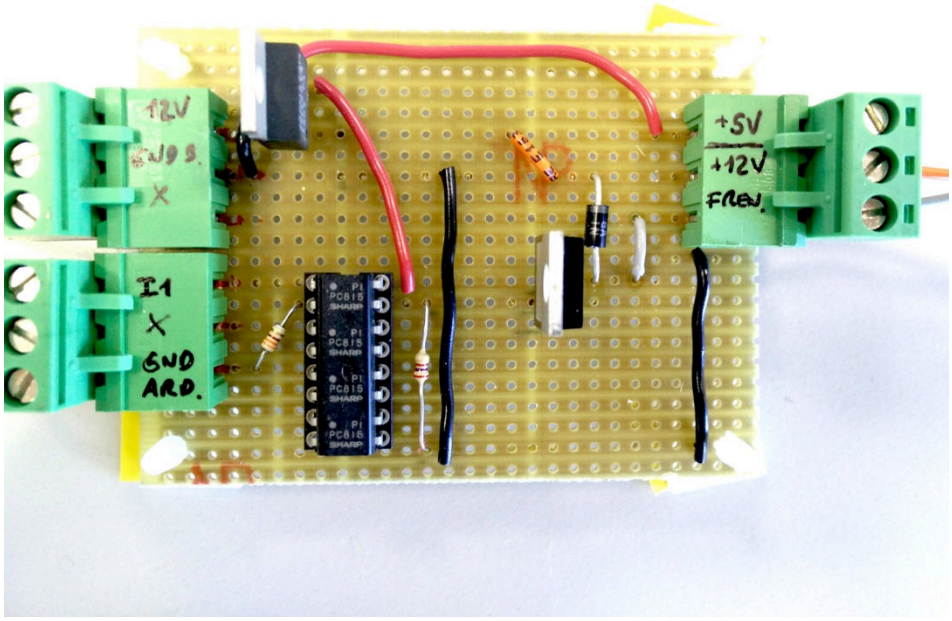


Figura 50. Conexiones de la tarjeta de freno

- IMU.
    - SCL de la brújula va al pin analógico 5
    - SDA al pin analógico 4.
    - Alimentación: 5V a 5V y GND a GND

1.3.3 CONEXIÓN DE LA ANTENA

La antena GPS se conecta al receptor GPS mediante una conexión RS232.

Capítulo 2 ARRANQUE DEL SISTEMA

Una vez se han conectado y alimentado los dispositivos correctamente se puede proceder a encenderlos. En primer lugar, el ordenador se enciende con el botón de encendido que tiene. Por su parte, la Arduino se enciende en el momento en que le llega alimentación por la conexión USB, es decir, cuando está conectada a un ordenador encendido. El receptor GPS también cuenta con un botón de encendido y apagado.

El resto de componentes no tienen sistemas de encendido y apagado más allá de sus conexiones de alimentación.

Aunque se han explicado todas las conexiones es preciso que los actuadores se conecten una vez el sistema está arrancado para evitar posibles accidentes por programas cargados en el microcontrolador que puedan poner en movimiento el quad.

El primer paso del arranque es conectar el ordenador con el receptor GPS para que reciba información de la posición y para que el receptor reciba la corrección DGPS para poder medir la velocidad y la posición con precisión. Primero se configura la recepción de datos con las correcciones DGPS (ver Figura 51) y después se configura el envío de estos datos desde el ordenador al receptor GPS por el puerto serie (ver Figura 52).

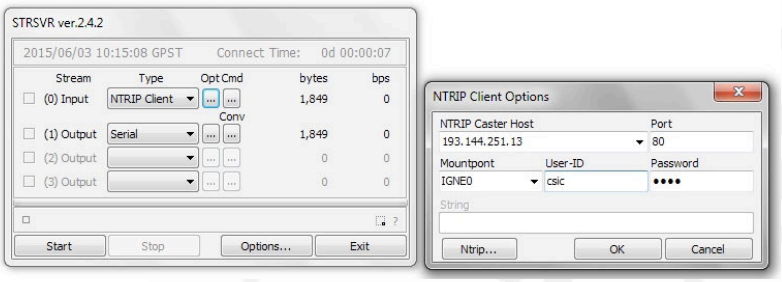


Figura 51. Configuración de la señal DGPS

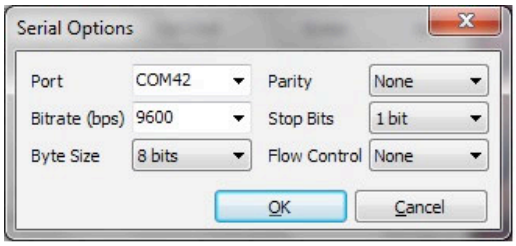


Figura 52. Configuración de la transmisión de las correcciones DGPS al receptor GPS

Después se crea una red WiFi desde el ordenador de exteriores para poder conectarse con el ordenador que va a enviar los comandos inalámbricamente. En la Figura 53 se muestra los comandos a escribir en la ventana de comandos para crear una red WLAN que tiene que llamarse "quad" con la contraseña "quadquad" y que permite la conexión de otros dispositivos.

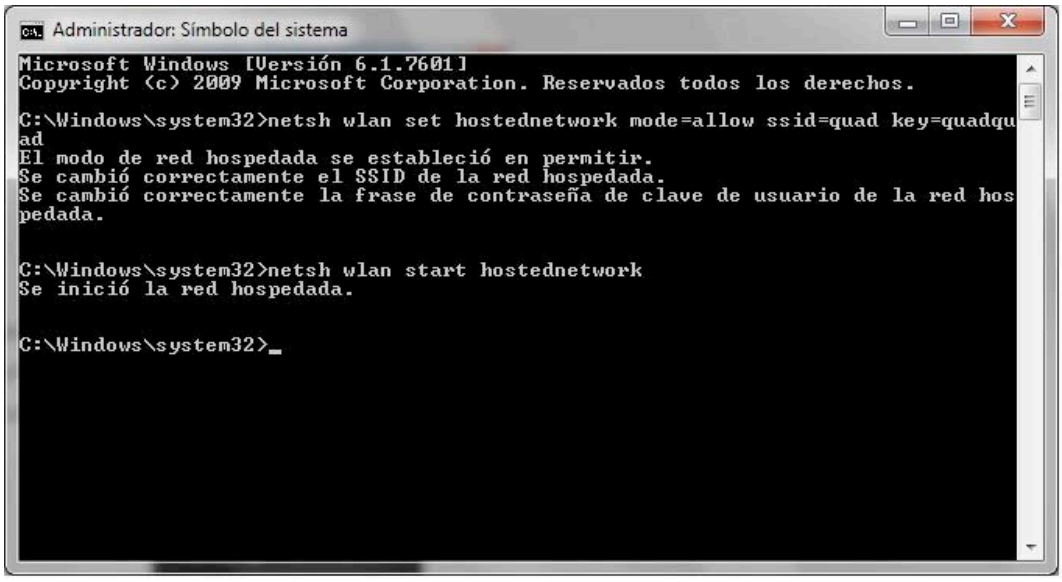

Administrador: Símbolo del sistema
Microsoft Windows [Versión 6.1.7601]
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. Reservados todos los derechos.
C:\Windows\system32>netsh wlan set hostednetwork mode=allow ssid=quad key=quadqu
ad
El modo de red hospedada se estableció en permitir.
Se cambió correctamente el SSID de la red hospedada.
Se cambió correctamente la frase de contraseña de clave de usuario de la red hos
pedada.
C:\Windows\system32>netsh wlan start hostednetwork
Se inició la red hospedada.
C:\Windows\system32>_

Figura 53. Comandos para la creación de una red WiFi

A continuación se configuran las direcciones IP y máscaras que van a utilizar los ordenadores para comunicarse siguiendo la información mostrada en la Figuras 54 y 55..

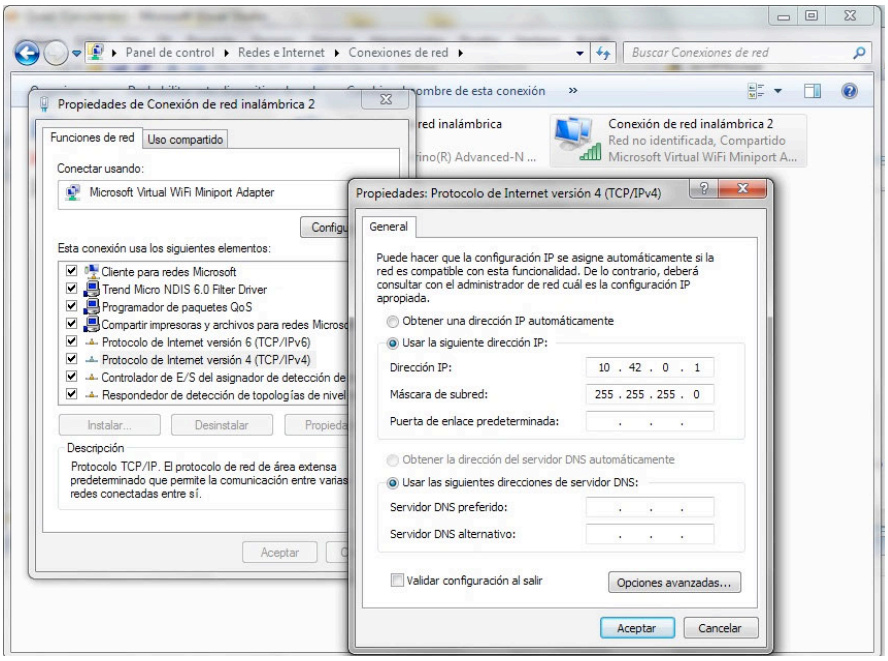

Panel de control ▸ Redes e Internet ▸ Conexiones de red ▸
Buscar Conexiones de red
Propiedades de Conexión de red inalámbrica 2
Funciones de red
Uso compartido
Conectar usando:
Microsoft Virtual WiFi Miniport Adapter
Esta conexión usa los siguientes elementos:
Cliente para redes Microsoft
Trend Micro NDIS 6.0 Filter Driver
Programador de paquetes QoS
Protocolo de Internet versión 6 (TCP/IPv6)
Protocolo de Internet versión 4 (TCP/IPv4)
Instalar...
Desinstalar
Descripción
Protocolo TCP/IP. El protocolo de red de área extensa predeterminado que permite la comunicación entre varias redes conectadas entre sí.
Aceptar
Conexión de red inalámbrica 2
Red no identificada, Compartido
Microsoft Virtual WiFi Miniport A...
Propiedades: Protocolo de Internet versión 4 (TCP/IPv4)
General
Puede hacer que la configuración IP se asigne automáticamente si la red es compatible con esta funcionalidad. De lo contrario, deberá consultar con el administrador de red cuál es la configuración IP apropiada.
Obtener una dirección IP automáticamente
Usar la siguiente dirección IP:
Dirección IP: 10 . 42 . 0 . 1
Máscara de subred: 255 . 255 . 255 . 0
Puerta de enlace predeterminada:
Obtener la dirección del servidor DNS automáticamente
Usar las siguientes direcciones de servidor DNS:
Servidor DNS preferido:
Servidor DNS alternativo:
Validar configuración al salir
Opciones avanzadas...
Aceptar
Cancelar

Figura 54. Configuración de la dirección IP del servidor

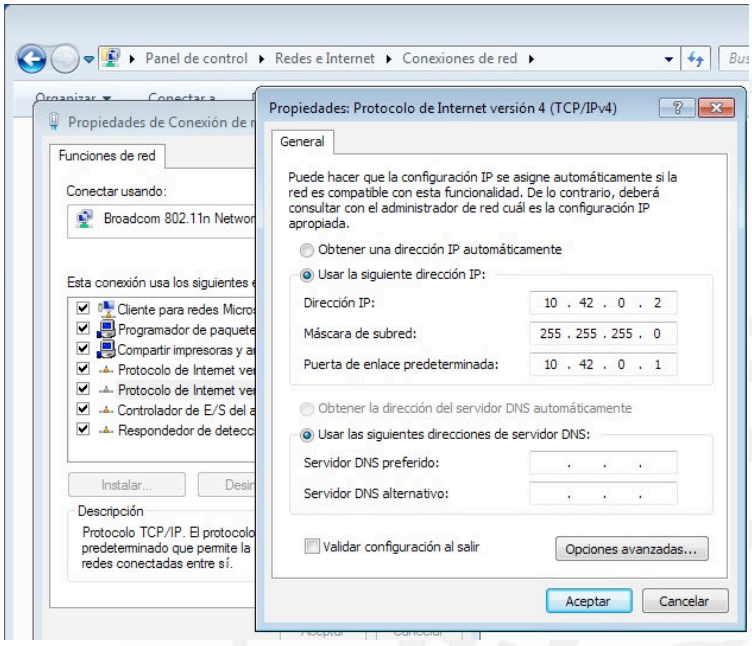

Panel de control ▸ Redes e Internet ▸ Conexiones de red ▸
Propiedades de Conexión de r
Funciones de red
Conectar usando:
Broadcom 802.11n Networ
Esta conexión usa los siguientes
Instalar...
Descripción
Protocolo TCP/IP. El protocolo predeterminado que permite la redes conectadas entre sí.
Propiedades: Protocolo de Internet versión 4 (TCP/IPv4)
General
Puede hacer que la configuración IP se asigne automáticamente si la red es compatible con esta funcionalidad. De lo contrario, deberá consultar con el administrador de red cuál es la configuración IP apropiada.
Obtener una dirección IP automáticamente
Usar la siguiente dirección IP:
Dirección IP: 10 . 42 . 0 . 2
Máscara de subred: 255 . 255 . 255 . 0
Puerta de enlace predeterminada: 10 . 42 . 0 . 1
Obtener la dirección del servidor DNS automáticamente
Usar las siguientes direcciones de servidor DNS:
Servidor DNS preferido:
Servidor DNS alternativo:
Validar configuración al salir
Opciones avanzadas...
Aceptar
Cancelar

Figura 55. Configuración de la dirección IP del ordenador que envía los datos desde la interfaz

Una vez configurada la red y establecidas las direcciones se conecta el ordenador del operario con el que se van a enviar los comandos al quad, se introduce la contraseña y se arranca la interfaz.

Capítulo 3 FUNCIONAMIENTO Y OBTENCIÓN DE LOS DATOS DE NAVEGACIÓN

Con todo el sistema arrancado sólo falta comprender el funcionamiento de la interfaz y la lectura de los datos de navegación. En primer lugar, la interfaz sirve para teleoperar el quad controlando la velocidad a la que se quiere que se mueva y el ángulo de giro desado. En la Figura 56 se muestra un ejemplo del funcionamiento de la interfaz. Haciendo "click" sobre las flechas o pulsando sobre las teclas correspondientes del teclado se pueden controlar las variables que ya se han mencionado. Las flechas que apuntan hacia arriba y hacia abajo sirven para aumentar o disminuir la velocidad respectivamente. Las flechas que señalan hacia la derecha sirven para variar el ángulo en las direcciones que indican. Además, hay dos botones que sirven para conectar el receptor GPS al sistema (Connect) o para indicar que se finalice esta conexión (Disconnect). Finalmente, si se hace click sobre el botón STOP se para el quad.

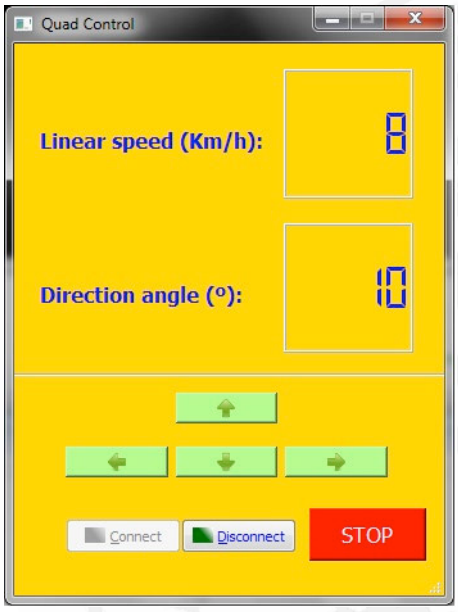


Figura 56. Ejemplo de la interfaz

Debido a las limitaciones que tiene la Arduino y que el puerto serie del ordenador está muy ocupado se ha incluido un módulo, que se muestra en la Figura 57, que permite guardar archivos en formato .TXT en una tarjeta SD. Sacando esta tarjeta del módulo y conectándola al lector de tarjetas se puede extraer un archivo que se llama datalogger.txt y que contiene los valores de las distintas variables durante la navegación.

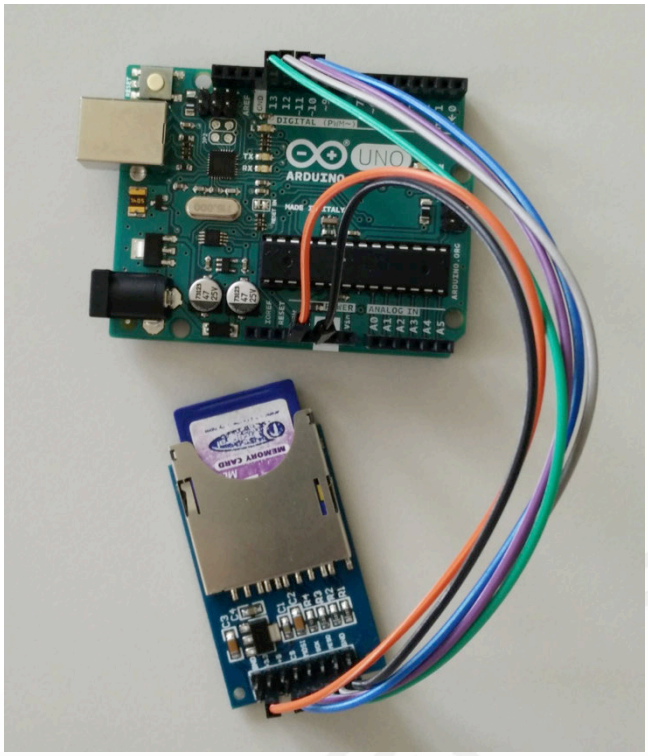


Figura 57. Módulo SD conectado a la Arduino UNO

.

Parte VI DATASHEETS

Small Signal Transistors

TO-18 Case

TYPE NO.	DESCRIPTION	BV_{CBO} (V) MIN	BV_{CEO} (V) MIN	BV_{EBO} (V) MIN	I_{CBO} @ (µA) MAX *ICES **ICEV	V_{CB} (V)	h_{FE} MIN	h_{FE} MAX	@ I_C (mA)	@ V_{CE} (V)	$V_{CE\ (SAT)}$ (V) MAX	@ I_C (mA)	C_{ob} (pF) MAX	f_T (MHz) MIN	NF (dB) MAX	t_{on} (ns) MAX	t_{off} (ns) MAX
2N703	NPN AMPL/SWITCH	25	25	5.0	- -	- -	40	100	10	10	0.5	10	5.0	70	- -	- -	- -
2N706C	NPN SAT SWITCH	40	15	5.0	0.5	15	20	60	10	5.0	0.3	30	5.0	200	- -	40	75
2N708	NPN SAT SWITCH	40	15	5.0	0.025	20	30	120	10	1.0	0.4	10	6.0	400	- -	40	70
2N709A	NPN SAT SWITCH	15	6.0	4.0	0.005	5.0	30	90	10	0.5	0.3	3.0	3.0	900	- -	15	15
2N717	NPN AMPL/SWITCH	60	40	5.0	- -	- -	20	60	150	10	1.5	150	35	40	- -	- -	- -
2N718A	NPN AMPL/SWITCH	75	32	7.0	0.01	60	40	120	150	10	1.5	150	25	60	- -	- -	- -
2N719A	NPN AMPL/SWITCH	120	60	7.0	0.01	75	20	60	150	10	5.0	150	15	40	- -	- -	- -
2N720A	NPN AMPL/SWITCH	120	80	7.0	0.01	90	40	120	150	10	5.0	150	15	50	- -	- -	- -
2N721	PNP AMPL/SWITCH	50	35	5.0	1.0	30	20	45	150	10	1.5	150	45	50	- -	- -	- -
2N722A	PNP AMPL/SWITCH	50	35	5.0	0.10	30	30	90	150	10	1.5	150	45	60	- -	- -	- -
2N726	PNP AMPL/SWITCH	25	20	5.0	1.0	25	15	45	10	1.0	0.6	10	5.0	140	- -	- -	- -
2N727	PNP AMPL/SWITCH	25	20	5.0	1.0	25	30	120	10	1.0	0.6	10	5.0	140	- -	- -	- -
2N730	NPN AMPL/SWITCH	60	35	5.0	- -	- -	20	60	150	10	1.5	150	35	40	- -	- -	- -
2N731	NPN AMPL/SWITCH	60	35	5.0	- -	- -	40	120	150	10	1.5	150	35	50	- -	- -	- -
2N743A	NPN SAT SWITCH	40	15	5.0	- -	- -	20	60	10	5.0	0.6	100	4.0	500	- -	12	15
2N744A	NPN SAT SWITCH	40	15	5.0	- -	- -	40	120	10	5.0	0.6	100	4.0	500	- -	12	15
2N753	NPN SAT SWITCH	25	20	5.0	0.05	15	40	120	10	1.0	0.6	10	5.0	200	- -	40	75
2N760A	NPN LOW NOISE	60	60	8.0	0.10	30	76	333	1.0	5.0	1.0	10	8.0	50	- -	- -	- -
2N783	NPN SAT SWITCH	40	15	5.0	0.25	25	20	60	10	1.0	0.25	10	3.5	200	- -	16	30
2N784A	NPN SAT SWITCH	40	15	5.0	- -	- -	25	150	10	5.0	0.19	10	3.5	300	- -	20	40
2N834A	NPN SAT SWITCH	40	25	5.0	0.50	20	25	- -	10	1.0	0.25	10	4.0	500	- -	16	24
2N835	NPN SAT SWITCH	25	20	5.0	0.50	20	20	- -	10	1.0	0.3	10	4.0	300	- -	20	35
2N864	PNP AMPL/SWITCH	6.0	6.0	6.0	0.10	10	25	125	1.0	6.0	0.1	5.0	9.0	- -	- -	- -	- -
2N865	PNP AMPL/SWITCH	10	6.0	6.0	0.10	10	100	350	1.0	6.0	0.1	5.0	9.0	- -	- -	- -	- -
2N869A	PNP AMPL/SWITCH	25	18	5.0	0.01	15	40	120	10	5.0	0.15	10	6.0	400	- -	- -	- -
2N870	NPN AMPL/SWITCH	100	60	7.0	0.01	75	20	120	150	10	5.0	150	15	50	- -	- -	- -
2N871	NPN AMPL/SWITCH	100	60	7.0	0.01	75	100	300	150	10	5.0	150	15	60	- -	- -	- -
2N909	NPN AMPL SWITCH	30	25	5.0	- -	- -	110	350	50	10	2.0	50	25	50	- -	- -	- -
2N910	NPN AMPL/SWITCH	100	60	7.0	0.025	75	75	- -	10	10	1.2	50	15	60	- -	- -	- -
2N911	NPN AMPL/SWITCH	100	60	7.0	0.025	75	35	- -	10	10	1.2	50	15	50	- -	- -	- -
2N912	NPN AMPL/SWITCH	100	60	7.0	0.025	75	15	- -	10	10	1.2	50	15	40	- -	- -	- -
2N914	NPN SAT SWITCH	40	15	5.0	0.025	20	30	120	10	1.0	0.7	200	6.0	60	- -	40	40
2N915	NPN RF/IF OSC	70	50	5.0	- -	- -	50	200	10	10	- -	- -	3.5	250	- -	- -	- -
2N916	NPN RF/IF OSC	45	45	5.0	- -	-	50	200	10	10	- -	- -	6.0	300	- -	- -	- -
2N929A	NPN LOW NOISE	60	45	6.0	0.02	45	40	120	0.01	5.0	0.5	10	6.0	45	4.0	- -	- -
2N930B	NPN LOW NOISE	60	45	6.0	0.20	45	100	300	0.01	5.0	0.5	10	6.0	45	3.0	- -	- -
2N947	NPN SAT SWITCH	15	12	3.0	- -	- -	30	- -	10	1.0	0.4	5.0	8.0	200	- -	- -	50
2N956	NPN AMPL/SWITCH	75	50	7.0	0.01	60	100	300	150	10	1.5	150	25	70	- -	- -	- -

Sealed Lead-Acid Battery
General Purpose

698-8091(12V4.0Ah)

Specification

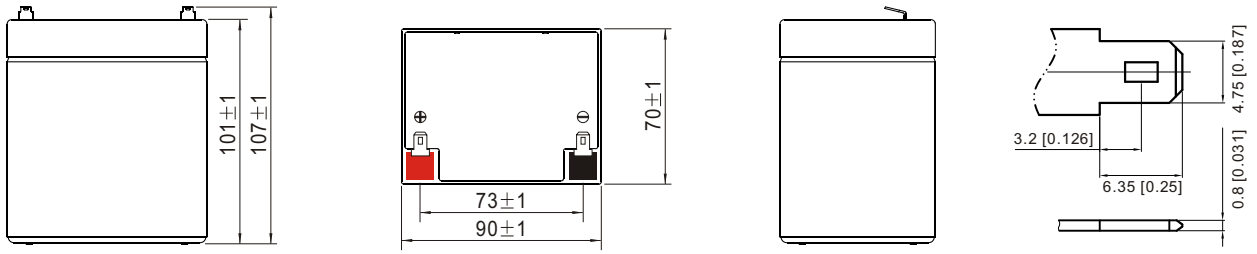
Cells Per Unit	6
Voltage Per Unit	12
Capacity	4.0Ah@20hr-rate to 1.80V per cell @25°C
Weight	Approx 1.48kg
Max. Discharge Current	60 A(5 sec)
Internal Resistance	Approx 40mΩ
Operating Temp.Range	Discharge : -15～50°C (5～122°F) Charge : 0～40°C (32～104°F) Storage : -15～40°C (5～104°F)
Nominal Operating Temp. Range	25±3°C (77±5°F)
Float charging Voltage	13.5to 13.8VDC/unit Average at 25°C
Recommended Maximum Charging Current Limit	1.20A
Equalization and Cycle Service	14.4to15.0 VDC/unit Average at 25°C
Self Discharge	The batteries can be stored for more than 6 months at 25°C. Self-discharge ratio less than 3% per month at 25°C. Please charge batteries before using.
Terminal	T1
Container Material	A.B.S. (UL94-HB) , Flammability resistance of UL94-V0 can be available upon request.

Applications

- *All purpose*
- *Uninterruptable Power Supply (UPS)*
- *Electric Power System (EPS)*
- *Emergency backup power supply*
- *Emergency light*
- *Railway signal*
- *Aircraft signal*
- *Alarm and security system*
- *Electronic apparatus and equipment*
- *Communication power supply*
- *DC power supply*
- *Auto control system*

Dimensions

Unit: mm Dimension: 90(L)×70(W)×101(H)×107(TH)



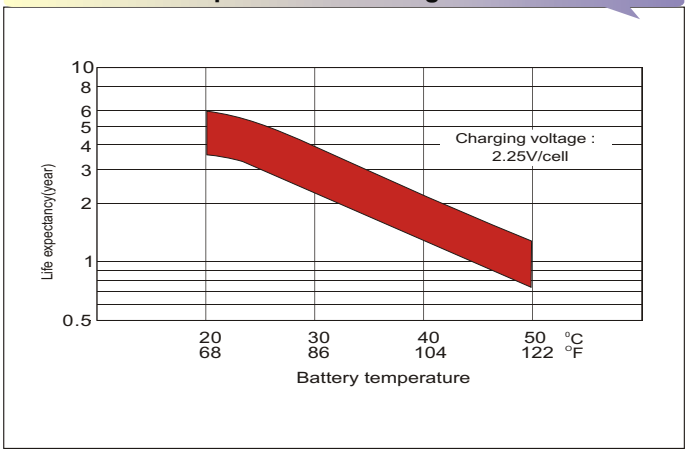
Constant Current Discharge Characteristics : A (25°C) — Amps

F.V/Time	5min	10min	15min	20min	30min	45min	1h	2h	3h	4h	5h	6h	8h	10h	20h
1.85V/cell	7.68	5.35	4.42	3.83	3.07	2.36	1.93	1.18	0.899	0.739	0.627	0.543	0.432	0.359	0.198
1.80V/cell	9.44	6.39	5.12	4.33	3.40	2.58	2.08	1.25	0.945	0.777	0.654	0.567	0.448	0.372	0.200
1.75V/cell	11.2	7.22	5.65	4.72	3.63	2.74	2.19	1.31	0.979	0.801	0.672	0.581	0.460	0.379	0.202
1.70V/cell	12.7	7.97	6.11	5.06	3.82	2.84	2.28	1.36	1.01	0.821	0.689	0.595	0.467	0.386	0.206
1.65V/cell	14.0	8.57	6.46	5.32	3.98	2.95	2.38	1.40	1.04	0.838	0.704	0.607	0.475	0.391	0.208
1.60V/cell	14.7	8.93	6.74	5.48	4.09	3.02	2.43	1.45	1.06	0.859	0.718	0.619	0.485	0.398	0.210

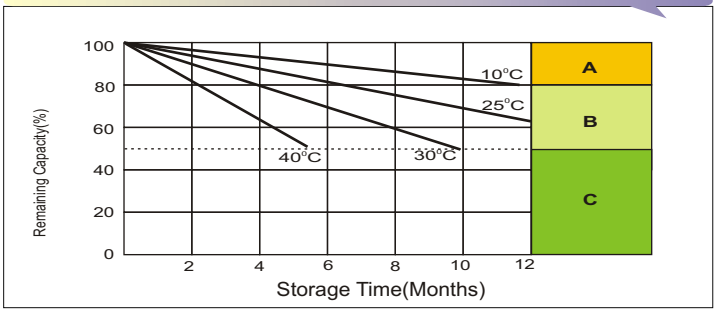
Constant Power Discharge Characteristics : W (25°C) — Watts

F.V/Time	5min	10min	15min	20min	30min	45min	1h	2h	3h	4h	5h	6h	8h	10h	20h
1.85V/cell	14.5	10.2	8.49	7.42	5.99	4.63	3.81	2.34	1.79	1.47	1.26	1.09	0.869	0.724	0.400
1.80V/cell	17.6	12.0	9.76	8.33	6.59	5.02	4.07	2.47	1.87	1.54	1.30	1.13	0.896	0.745	0.402
1.75V/cell	20.6	13.5	10.7	9.00	6.99	5.30	4.26	2.56	1.92	1.58	1.33	1.15	0.914	0.755	0.403
1.70V/cell	23.1	14.7	11.4	9.59	7.29	5.47	4.42	2.65	1.97	1.61	1.35	1.17	0.922	0.763	0.408
1.65V/cell	25.1	15.6	12.0	9.96	7.53	5.65	4.57	2.71	2.01	1.63	1.38	1.19	0.933	0.770	0.412
1.60V/cell	26.0	16.1	12.3	10.2	7.67	5.72	4.64	2.78	2.05	1.66	1.40	1.21	0.947	0.779	0.412

Effect of Temperature on Long Term Float Life



Self Discharge Characteristics

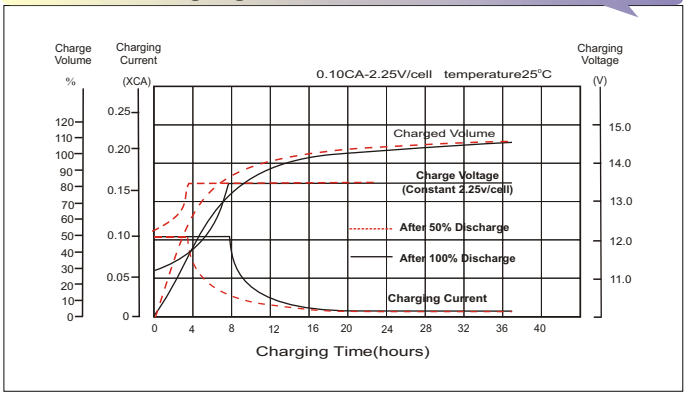


A No supplementary charge required
(Carry out supplementary charge before use if 100% capacity is required.)

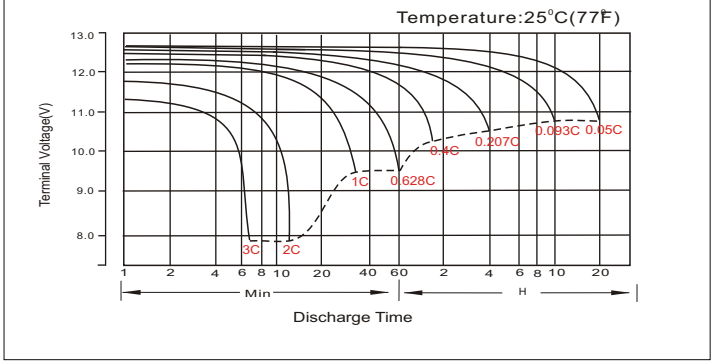
B Supplementary charge required before use.Optional charging way as below:
1.Charged for above 3 days at limted current 0.25CA and constant volatge 2.25V/cell.
2.Charged for above 20hours at limted current 0.25CA and constant volatge 2.45V/cell.
3.Charged for 8~10hours at limted current 0.05CA .

C Avoid this storage period unless regular Top charge.
Supplementary charge may often fail to recover the full capacity

Float Charging Characteristics



Discharge Characteristics



Available Capacity Subject to Temperature

Battery Type		-20℃	-10℃	0℃	5℃	10℃	20℃	25℃	30℃	40℃	45℃
AGM Battery	6V&12V	46%	66%	76%	83%	90%	98%	100%	103%	107%	109%

Discharge Current VS. Discharge Voltage

Final Discharge Voltage V/cell	1.80V	1.75V	1.60V
Discharge Current (A)	（A）≤0.2C	0.2C＜（A）＜1.0C	（A）≥1.0C

Charge the batteries at least once every six months, if they are stored at 25°C.

Charging Method:

Constant Voltage	-0.2Cx2h+2.4~2.45V/Cellx24h,Max. Current 0.3CA
Constant Current	0.1C until the voltage reaching 14.4V,then 0.1Cx4h

Pb

Maintenance & Cautions

Float Service:
◆It is recommended to check battery/Float voltage each month.
Equalisation charge:
◆Equalisation charging is recommended once every 3 to 6 months using.
◆Discharge 100% rated capacity.
◆Charge 2.35v/cell constant voltage, maximum 0.3CA 24hrs.
Cyclic Service:
◆Temperature compensation for varying temperatures:
-Charge voltage -3mV/Cell/degC from 25degC norm.
◆The service life of your battery will be affected by:
-The number of discharge cycles, depth of discharge, ambient
temperature and charging voltage.

Issue date: Oct. 2014

Sealed Lead-Acid Battery
General Purpose

537-5494(12V18Ah)

Specification

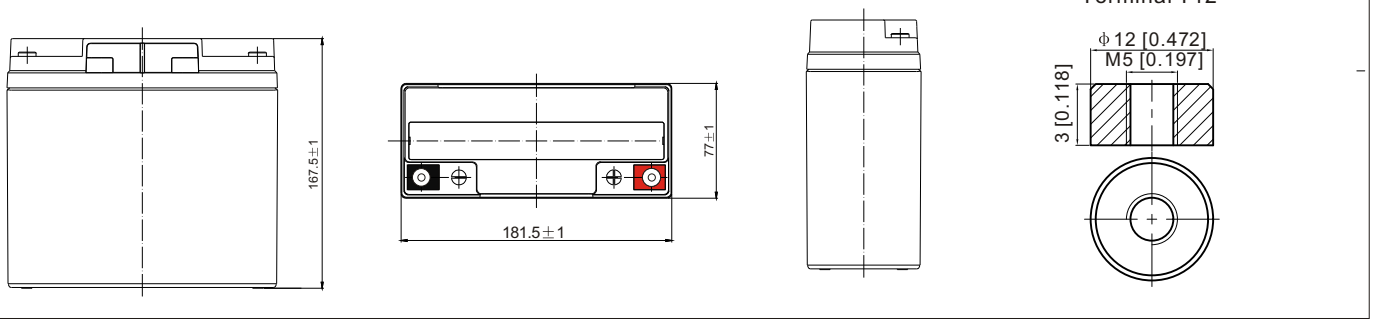
Cells Per Unit	6
Voltage Per Unit	12
Capacity	18.0Ah@20hr-rate to 1.80V per cell @25°C
Weight	Approx 5.4 kg
Max. Discharge Current	270A (5 sec)
Internal Resistance	Approx 16mΩ
Operating Temp.Range	Discharge : -15～50°C (5～122°F) Charge : 0～40°C (32～104°F) Storage : -15～40°C (5～104°F)
Nominal Operating Temp. Range	25±3°C (77±5°F)
Float charging Voltage	13.5 to 13.8 VDC/unit Average at 25°C
Recommended Maximum Charging Current Limit	5.4A
Equalization and Cycle Service	14.4 to 15.0 VDC/unit Average at 25°C
Self Discharge	The batteries can be stored for more than 6 months at 25°C. Self-discharge ratio less than 3% per month at 25°C. Please charge batteries before using.
Terminal	T12
Container Material	A.B.S. (UL94-HB) , Flammability resistance of UL94-V0 can be available upon request.

Applications

- *All purpose*
- *Uninterruptable Power Supply (UPS)*
- *Electric Power System (EPS)*
- *Emergency backup power supply*
- *Emergency light*
- *Railway signal*
- *Aircraft signal*
- *Alarm and security system*
- *Electronic apparatus and equipment*
- *Communication power supply*
- *DC power supply*
- *Auto control system*

Dimensions

Unit: mm Dimension: 181.5(L)×77(W)×167.5(H)×167.5(TH)



Constant Current Discharge Characteristics : A (25°C)

Amps

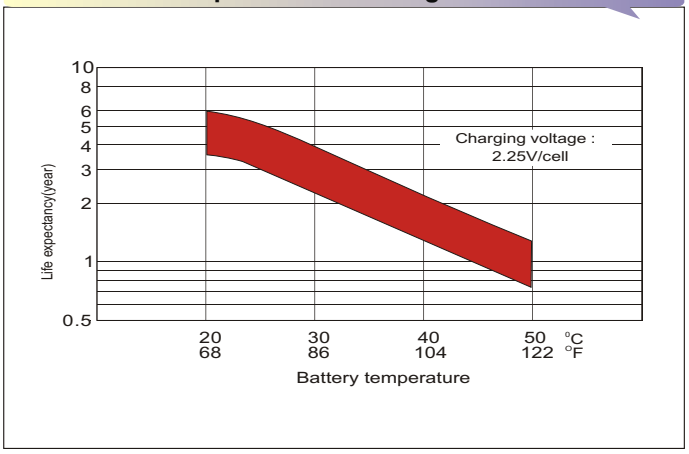
F.V/Time	5min	10min	15min	20min	30min	45min	1h	2h	3h	4h	5h	6h	8h	10h	20h
1.85V/cell	33.9	25.6	22.7	19.9	15.3	11.4	9.11	5.51	4.13	3.35	2.84	2.47	1.96	1.63	0.884
1.80V/cell	40.8	30.2	25.9	22.1	16.7	12.2	9.79	5.85	4.34	3.51	2.94	2.55	2.02	1.67	0.900
1.75V/cell	45.8	33.0	27.8	23.4	17.4	12.8	10.2	6.07	4.49	3.60	3.03	2.62	2.06	1.70	0.918
1.70V/cell	49.9	35.4	29.7	24.7	18.1	13.2	10.6	6.27	4.63	3.69	3.09	2.67	2.09	1.72	0.929
1.65V/cell	53.8	37.7	31.1	25.8	18.9	13.8	10.9	6.44	4.73	3.77	3.14	2.71	2.12	1.74	0.938
1.60V/cell	57.9	39.6	31.9	26.4	19.3	14.0	11.1	6.59	4.82	3.84	3.20	2.74	2.15	1.76	0.945

Constant Power Discharge Characteristics : W (25°C)

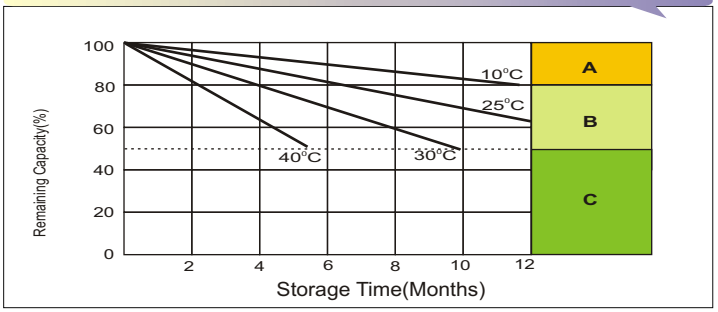
Watts

F.V/Time	5min	10min	15min	20min	30min	45min	1h	2h	3h	4h	5h	6h	8h	10h	20h
1.85V/cell	64.0	48.8	43.6	38.5	29.8	22.3	17.9	10.9	8.21	6.68	5.68	4.95	3.95	3.29	1.79
1.80V/cell	76.3	57.2	49.5	42.7	32.4	23.9	19.2	11.5	8.59	6.98	5.86	5.09	4.04	3.36	1.81
1.75V/cell	84.8	62.0	52.8	44.8	33.6	24.9	20.0	11.9	8.87	7.14	6.02	5.21	4.11	3.39	1.82
1.70V/cell	91.1	65.6	55.7	46.8	34.7	25.6	20.6	12.2	9.06	7.25	6.08	5.27	4.15	3.42	1.83
1.65V/cell	96.6	68.8	57.5	48.4	35.8	26.3	21.0	12.5	9.19	7.35	6.15	5.32	4.18	3.43	1.84
1.60V/cell	101.5	70.8	58.0	48.7	36.0	26.5	21.3	12.7	9.31	7.45	6.22	5.33	4.21	3.45	1.85

Effect of Temperature on Long Term Float Life



Self Discharge Characteristics

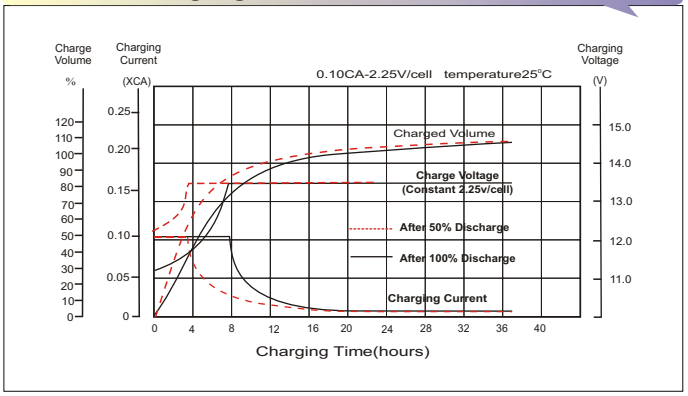


A No supplementary charge required
(Carry out supplementary charge before use if 100% capacity is required.)

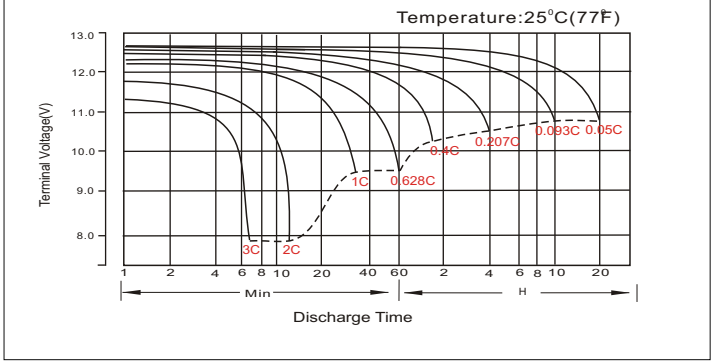
B Supplementary charge required before use.Optional charging way as below:
1.Charged for above 3 days at limted current 0.25CA and constant volatge 2.25V/cell.
2.Charged for above 20hours at limted current 0.25CA and constant volatge 2.45V/cell.
3.Charged for 8~10hours at limted current 0.05CA .

C Avoid this storage period unless regular Top charge.
Supplementary charge may often fail to recover the full capacity

Float Charging Characteristics



Discharge Characteristics



Available Capacity Subject to Temperature

Battery Type		-20℃	-10℃	0℃	5℃	10℃	20℃	25℃	30℃	40℃	45℃
AGM Battery	6V&12V	46%	66%	76%	83%	90%	98%	100%	103%	107%	109%

Discharge Current VS. Discharge Voltage

Final Discharge Voltage V/cell	1.80V	1.75V	1.60V
Discharge Current (A)	（A）≤0.2C	0.2C＜（A）＜1.0C	（A）≥1.0C

Charge the batteries at least once every six months, if they are stored at 25°C.

Charging Method:

Constant Voltage	-0.2Cx2h+2.4~2.45V/Cellx24h,Max. Current 0.3CA
Constant Current	0.1C until the voltage reaching 14.4V,then 0.1Cx4h

Pb

Maintenance & Cautions

Float Service:
◆It is recommended to check battery/Float voltage each month.
Equalisation charge:
◆Equalisation charging is recommended once every 3 to 6 months using.
◆Discharge 100% rated capacity.
◆Charge 2.35v/cell constant voltage, maximum 0.3CA 24hrs.
Cyclic Service:
◆Temperature compensation for varying temperatures:
-Charge voltage -3mV/Cell/degC from 25degC norm.
◆The service life of your battery will be affected by:
-The number of discharge cycles, depth of discharge, ambient
temperature and charging voltage.

Issue date: Oct. 2014

Soft Recovery Rectifier

Features:

- High surge current capability
- Void-free plastic package
- 2 Ampere operation at T_A = 55°C with no thermal runaway
- Fast switching for high efficiency
- Exceeds environmental standards of MIL-S-19500/228

Mechanical Data:

Case	: Moulded plastic DO-201AD
Terminals	: Axial leads, solderable per MIL-STD-202, Method 208
Polarity	: Band denotes Cathode end
Mounting position	: Any
Weight	: 0.04oz, 1.1g

Max. Ratings and Electrical Characteristics

Rating at 25°C ambient temperature unless otherwise specified.
Single phase, half wave, 60Hz, resistive or inductive load.
For capacitive load, derate current by 20%.

Parameter	Symbols	BY299	Units
Max. recurrent peak reverse voltage	V_{RRM}	800	V
Max. RMS voltage	V_{RMS}	560	
Max. DC blocking voltage	V_{DC}	800	
Max. average forward rectified current 0.375" (9.5mm) lead length at T_A = 55°C	$I_{(AV)}$	2	A
Peak forward surge current 10ms single half sine-wave superimposed on rated load	I_{FSM}	70	
Max. repetitive peak forward surge (Note 1)	I_{FRM}	10	
Max. instantaneous forward voltage at 3A	V_F	1.3	V
Max. DC reverse current (T_A = 25°C) at rated DC blocking voltage (T_A = 100°C)	I_R	10 500	µA
Max. reverse recovery time (Note 3) T_J = 25°C	T_{RR}	150	ns
Typical junction capacitance (Note 2) T_J = 25°C	C_J	28	pF
Typical thermal resistance (Note 4)	$R_{\theta JA}$	15	°C/W
Operating temperature range	T_J	-50 to +125	°C
Storage temperature range	T_{STG}	-50 to +150	

Notes:

1. Repetitive peak forward surge current at f <15kHz.
2. Measured at 1MHz and applied reverse voltage of 4V.
3. Reverse recovery test conditions: I_F = 0.5A, I_R = 1A, I_{rr} = 0.25A.
4. Thermal resistance from junction to ambient at 0.375" (9.5mm) lead length with both leads to heat sink.

Rating and Characteristics Curves

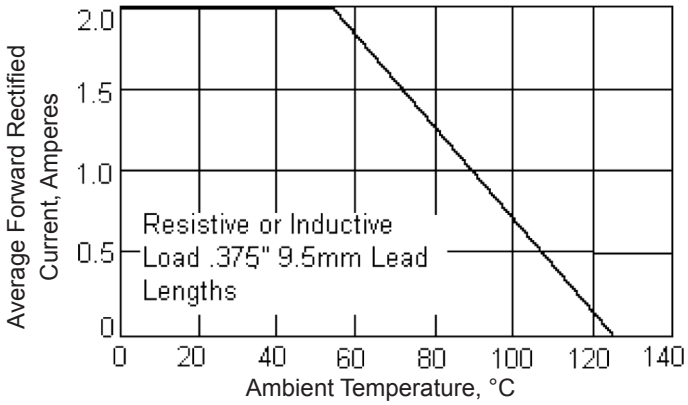


Figure 1 - Forward Current Derating Curve

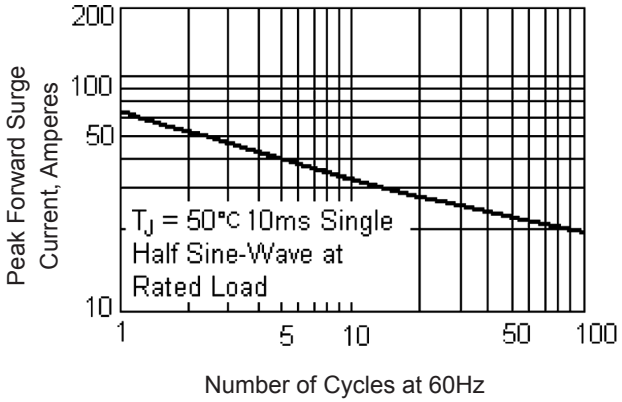
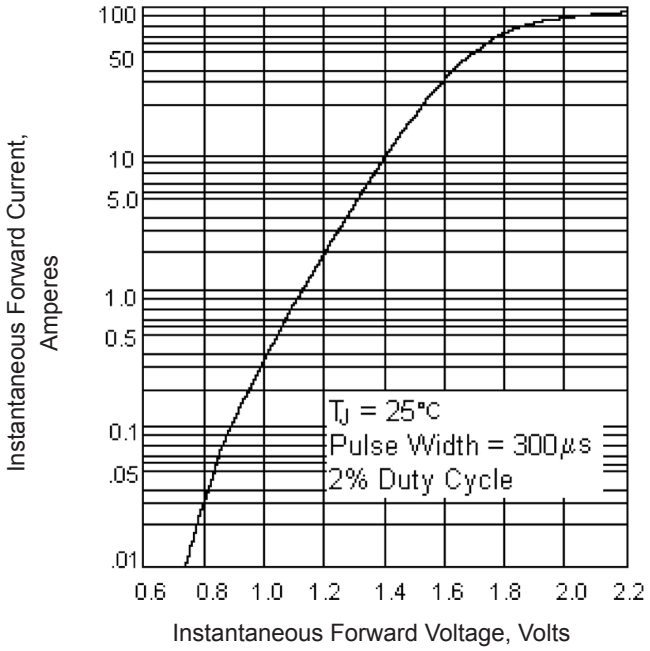
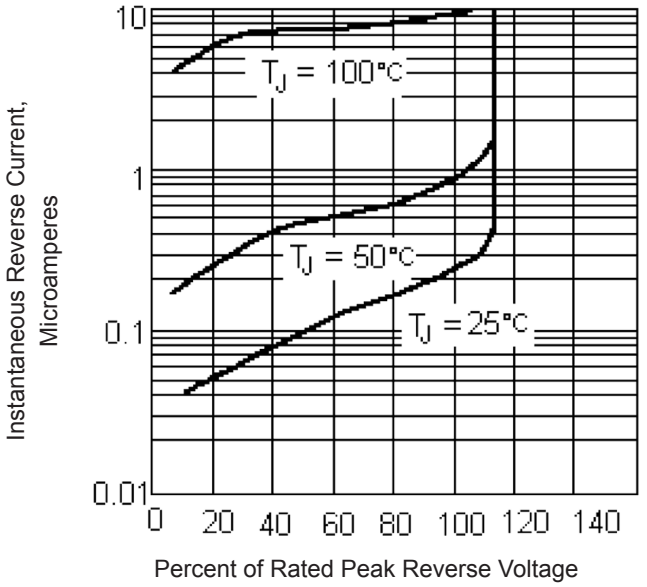
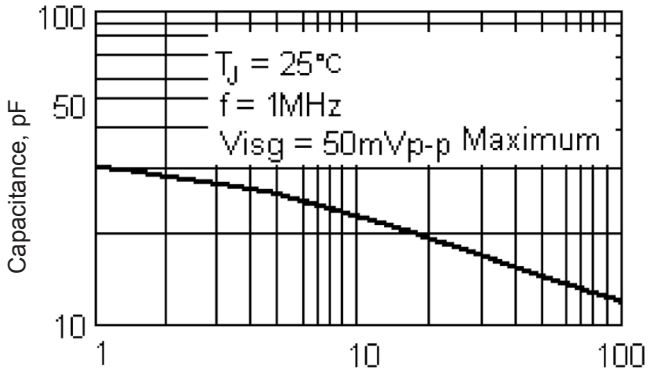


Figure 2 - Maximum Non-Repetitive Peak Forward Surge Current

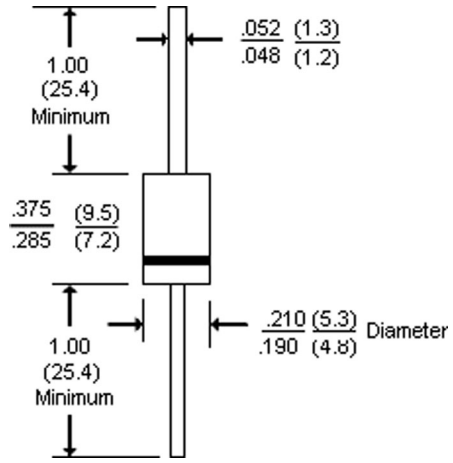






Dimensions

DO-201AD



Dimensions : Millimetres

Part Number Table

Description	Part Number
Diode, Fast, 2A, 800V	BY299

Important Notice : This data sheet and its contents (the "Information") belong to the members of the Premier Farnell group of companies (the "Group") or are licensed to it. No licence is granted for the use of it other than for information purposes in connection with the products to which it relates. No licence of any intellectual property rights is granted. The Information is subject to change without notice and replaces all data sheets previously supplied. The Information supplied is believed to be accurate but the Group assumes no responsibility for its accuracy or completeness, any error in or omission from it or for any use made of it. Users of this data sheet should check for themselves the Information and the suitability of the products for their purpose and not make any assumptions based on information included or omitted. Liability for loss or damage resulting from any reliance on the Information or use of it (including liability resulting from negligence or where the Group was aware of the possibility of such loss or damage arising) is excluded. This will not operate to limit or restrict the Group's liability for death or personal injury resulting from its negligence. Multicomp is the registered trademark of the Group. © Premier Farnell plc 2012.

1N4001, 1N4002, 1N4003, 1N4004, 1N4005, 1N4006, 1N4007

Axial Lead Standard Recovery Rectifiers

This data sheet provides information on subminiature size, axial lead mounted rectifiers for general−purpose low−power applications.

Features

- Shipped in Plastic Bags, 1000 per bag
- Available Tape and Reeled, 5000 per reel, by adding a “RL” suffix to the part number
- Available in Fan−Fold Packaging, 3000 per box, by adding a “FF” suffix to the part number
- Pb−Free Packages are Available

Mechanical Characteristics

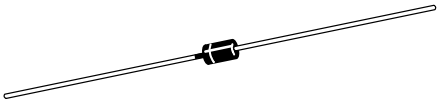
- Case: Epoxy, Molded
- Weight: 0.4 gram (approximately)
- Finish: All External Surfaces Corrosion Resistant and Terminal Leads are Readily Solderable
- Lead and Mounting Surface Temperature for Soldering Purposes: 260°C Max. for 10 Seconds, 1/16 in. from case
- Polarity: Cathode Indicated by Polarity Band

*For additional information on our Pb−Free strategy and soldering details, please download the ON Semiconductor Soldering and Mounting Techniques Reference Manual, SOLDERRM/D.

ON Semiconductor®

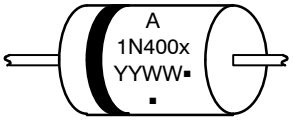
http://onsemi.com

LEAD MOUNTED RECTIFIERS 50−1000 VOLTS DIFFUSED JUNCTION



CASE 59−10
AXIAL LEAD
PLASTIC

MARKING DIAGRAM



A = Assembly Location
1N400x = Device Number
x = 1, 2, 3, 4, 5, 6 or 7
YY = Year
WW = Work Week
▪ = Pb−Free Package
(Note: Microdot may be in either location)

ORDERING INFORMATION

See detailed ordering and shipping information on page 5 of this data sheet.

© Semiconductor Components Industries, LLC, 2012

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	1N4001	1N4002	1N4003	1N4004	1N4005	1N4006	1N4007	Unit
†Peak Repetitive Reverse Voltage Working Peak Reverse Voltage DC Blocking Voltage	V_{RRM} V_{RWM} V_R	50	100	200	400	600	800	1000	V
†Non−Repetitive Peak Reverse Voltage (halfwave, single phase, 60 Hz)	V_{RSM}	60	120	240	480	720	1000	1200	V
†RMS Reverse Voltage	$V_{R(RMS)}$	35	70	140	280	420	560	700	V
†Average Rectified Forward Current (single phase, resistive load, 60 Hz, T_A = 75°C)	I_O	1.0							A
†Non−Repetitive Peak Surge Current (surge applied at rated load conditions)	I_{FSM}	30 (for 1 cycle)							A
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J T_{stg}	−65 to +175							°C

Stresses exceeding Maximum Ratings may damage the device. Maximum Ratings are stress ratings only. Functional operation above the Recommended Operating Conditions is not implied. Extended exposure to stresses above the Recommended Operating Conditions may affect device reliability.

†Indicates JEDEC Registered Data

THERMAL CHARACTERISTICS

Rating	Symbol	Max	Unit
Maximum Thermal Resistance, Junction−to−Ambient	$R_{\theta JA}$	Note 1	°C/W

ELECTRICAL CHARACTERISTICS†

Rating	Symbol	Typ	Max	Unit
Maximum Instantaneous Forward Voltage Drop, (i_F = 1.0 Amp, T_J = 25°C)	v_F	0.93	1.1	V
Maximum Full−Cycle Average Forward Voltage Drop, (I_O = 1.0 Amp, T_L = 75°C, 1 inch leads)	$V_{F(AV)}$	–	0.8	V
Maximum Reverse Current (rated DC voltage) (T_J = 25°C) (T_J = 100°C)	I_R	 0.05 1.0	 10 50	μA
Maximum Full−Cycle Average Reverse Current, (I_O = 1.0 Amp, T_L = 75°C, 1 inch leads)	$I_{R(AV)}$	–	30	μA

†Indicates JEDEC Registered Data

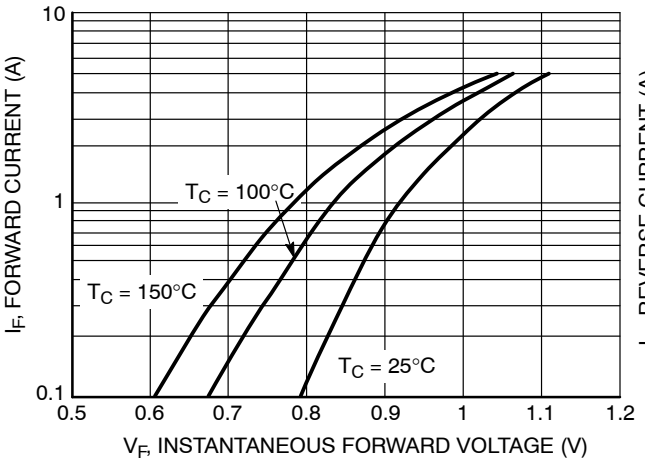


Figure 1. Typical Forward Voltage

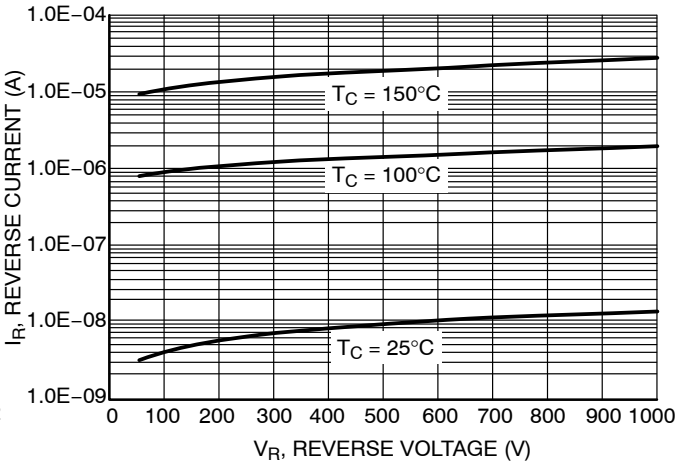


Figure 2. Typical Reverse Current

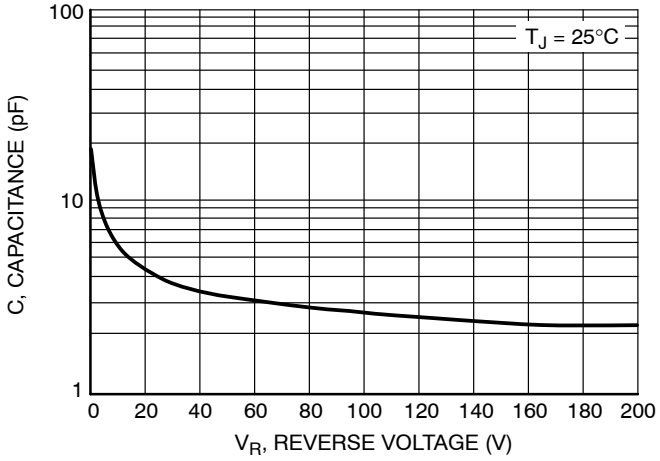


Figure 3. Typical Capacitance

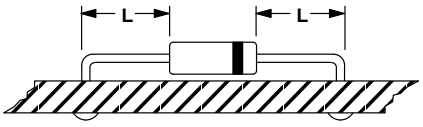
NOTE 1. – AMBIENT MOUNTING DATA

Data shown for thermal resistance, junction−to−ambient ($R_{\theta JA}$) for the mountings shown is to be used as typical guideline values for preliminary engineering or in case the tie point temperature cannot be measured.

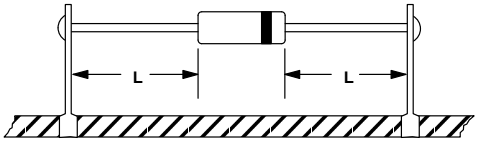
TYPICAL VALUES FOR $R_{\theta JA}$ IN STILL AIR

Mounting Method		Lead Length, L			Units
		1/8	1/4	1/2	
1	$R_{\theta JA}$	52	65	72	°C/W
2		67	80	87	°C/W
3		50			°C/W

MOUNTING METHOD 1

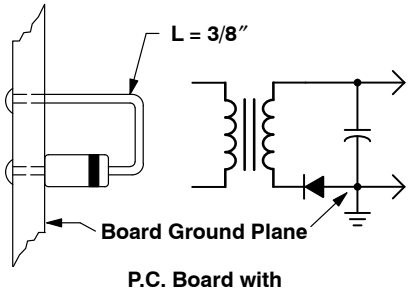


MOUNTING METHOD 2



Vector Pin Mounting

MOUNTING METHOD 3



P.C. Board with
1−1/2″ X 1−1/2″ Copper Surface

ORDERING INFORMATION

Device	Package	Shipping†
1N4001	Axial Lead*	1000 Units/Bag
1N4001G	Axial Lead* (Pb−Free)	1000 Units/Bag
1N4001FF	Axial Lead*	3000 Units/Box
1N4001FFG	Axial Lead* (Pb−Free)	3000 Units/Box
1N4001RL	Axial Lead*	5000/Tape & Reel
1N4001RLG	Axial Lead* (Pb−Free)	5000/Tape & Reel
1N4002	Axial Lead*	1000 Units/Bag
1N4002G	Axial Lead* (Pb−Free)	1000 Units/Bag
1N4002FF	Axial Lead*	3000 Units/Box
1N4002FFG	Axial Lead* (Pb−Free)	3000 Units/Box
1N4002RL	Axial Lead*	5000/Tape & Reel
1N4002RLG	Axial Lead* (Pb−Free)	5000/Tape & Reel
1N4003	Axial Lead*	1000 Units/Bag
1N4003G	Axial Lead* (Pb−Free)	1000 Units/Bag
1N4003FF	Axial Lead*	3000 Units/Box
1N4003FFG	Axial Lead* (Pb−Free)	3000 Units/Box
1N4003RL	Axial Lead*	5000/Tape & Reel
1N4003RLG	Axial Lead* (Pb−Free)	5000/Tape & Reel
1N4004	Axial Lead*	1000 Units/Bag
1N4004G	Axial Lead* (Pb−Free)	1000 Units/Bag
1N4004FF	Axial Lead*	3000 Units/Box
1N4004FFG	Axial Lead* (Pb−Free)	3000 Units/Box
1N4004RL	Axial Lead*	5000/Tape & Reel
1N4004RLG	Axial Lead* (Pb−Free)	5000/Tape & Reel
1N4005	Axial Lead*	1000 Units/Bag
1N4005G	Axial Lead* (Pb−Free)	1000 Units/Bag
1N4005FF	Axial Lead*	3000 Units/Box
1N4005FFG	Axial Lead* (Pb−Free)	3000 Units/Box
1N4005RL	Axial Lead*	5000/Tape & Reel
1N4005RLG	Axial Lead* (Pb−Free)	5000/Tape & Reel

†For information on tape and reel specifications, including part orientation and tape sizes, please refer to our Tape and Reel Packaging Specifications Brochure, BRD8011/D.
*This package is inherently Pb−Free.

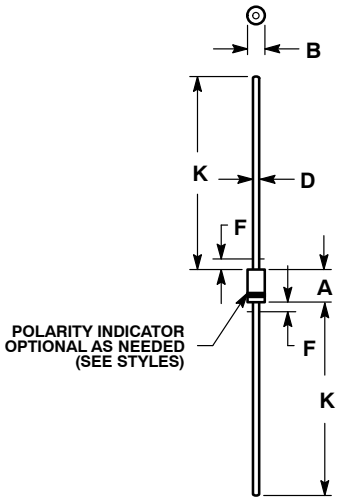
ORDERING INFORMATION

Device	Package	Shipping†
1N4006	Axial Lead*	1000 Units/Bag
1N4006G	Axial Lead* (Pb−Free)	1000 Units/Bag
1N4006FF	Axial Lead*	3000 Units/Box
1N4006FFG	Axial Lead* (Pb−Free)	3000 Units/Box
1N4006RL	Axial Lead*	5000/Tape & Reel
1N4006RLG	Axial Lead* (Pb−Free)	5000/Tape & Reel
1N4007	Axial Lead*	1000 Units/Bag
1N4007G	Axial Lead* (Pb−Free)	1000 Units/Bag
1N4007FF	Axial Lead*	3000 Units/Box
1N4007FFG	Axial Lead* (Pb−Free)	3000 Units/Box
1N4007RL	Axial Lead*	5000/Tape & Reel
1N4007RLG	Axial Lead* (Pb−Free)	5000/Tape & Reel

†For information on tape and reel specifications, including part orientation and tape sizes, please refer to our Tape and Reel Packaging Specifications Brochure, BRD8011/D.
*This package is inherently Pb−Free.

PACKAGE DIMENSIONS

AXIAL LEAD
CASE 59−10
ISSUE U



NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.
3. ALL RULES AND NOTES ASSOCIATED WITH JEDEC DO−41 OUTLINE SHALL APPLY
4. POLARITY DENOTED BY CATHODE BAND.
5. LEAD DIAMETER NOT CONTROLLED WITHIN F DIMENSION.

	INCHES		MILLIMETERS	
DIM	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.161	0.205	4.10	5.20
B	0.079	0.106	2.00	2.70
D	0.028	0.034	0.71	0.86
F	−−−	0.050	−−−	1.27
K	1.000	−−−	25.40	−−−

ON Semiconductor and ON are registered trademarks of Semiconductor Components Industries, LLC (SCILLC). SCILLC owns the rights to a number of patents, trademarks, copyrights, trade secrets, and other intellectual property. A listing of SCILLC's product/patent coverage may be accessed at www.onsemi.com/site/pdf/Patent−Marking.pdf. SCILLC reserves the right to make changes without further notice to any products herein. SCILLC makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does SCILLC assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages. "Typical" parameters which may be provided in SCILLC data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. SCILLC does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. SCILLC products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the SCILLC product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use SCILLC products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold SCILLC and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that SCILLC was negligent regarding the design or manufacture of the part. SCILLC is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer. This literature is subject to all applicable copyright laws and is not for resale in any manner.

PUBLICATION ORDERING INFORMATION

LITERATURE FULFILLMENT:
Literature Distribution Center for ON Semiconductor
P.O. Box 5163, Denver, Colorado 80217 USA
Phone: 303−675−2175 or 800−344−3860 Toll Free USA/Canada
Fax: 303−675−2176 or 800−344−3867 Toll Free USA/Canada
Email: orderlit@onsemi.com

N. American Technical Support: 800−282−9855 Toll Free USA/Canada
Europe, Middle East and Africa Technical Support:
Phone: 421 33 790 2910
Japan Customer Focus Center
Phone: 81−3−5817−1050

ON Semiconductor Website: **www.onsemi.com**

Order Literature: http://www.onsemi.com/orderlit

For additional information, please contact your local Sales Representative

1N4001/D

National Semiconductor

ADVANCE INFORMATION
October 2006

LM3405
550kHz/1.6MHz 1A Constant Current Buck Regulator for Powering LEDs

General Description

Integrated with a 1A power switch, the LM3405 is a current mode control switching buck regulator designed to provide a simple, high efficiency solution for driving LEDs. With a 0.2V reference voltage feedback control to minimize power dissipation, an external resistor sets the current as needed for driving various types of LEDs. Switching frequency is internally set to 550kHz (LM3405-Y) or 1.6MHz (LM3405-X), allowing small surface mount inductors and capacitors to be used. The LM3405 utilizes current mode control and internal compensation offering ease of use and predictable, high performance regulation over a wide range of operating conditions. Additional features include user accessible enable/dim pin for enabling and PWM dimming of LEDs, thermal shutdown, current limit and over voltage protection.

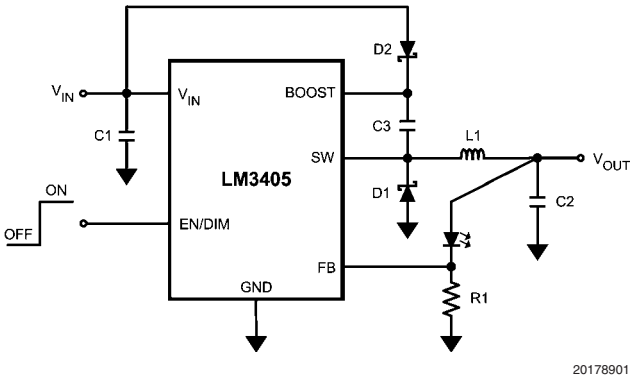
Features

- Thin SOT23-6 package
- 4.0V to 20V input voltage range
- 550kHz (LM3405Y) and 1.6MHz (LM3405X) switching frequencies
- 300mΩ NMOS switch
- 30nA shutdown current
- Enable/DIM input for enabling and PWM dimming of LEDs
- Requires only low value, ceramic capacitors
- Input voltage UVLO
- Internally compensated current mode control
- Thermal shutdown

Applications

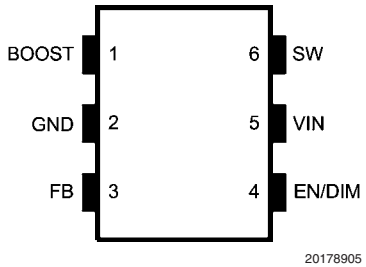
- LED Driver
- Constant Current Source

Typical Application Circuit



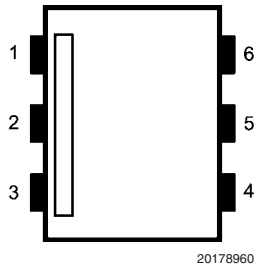
20178901

Connection Diagrams



20178905

6-Lead TSOT
NS Package Number MK06A

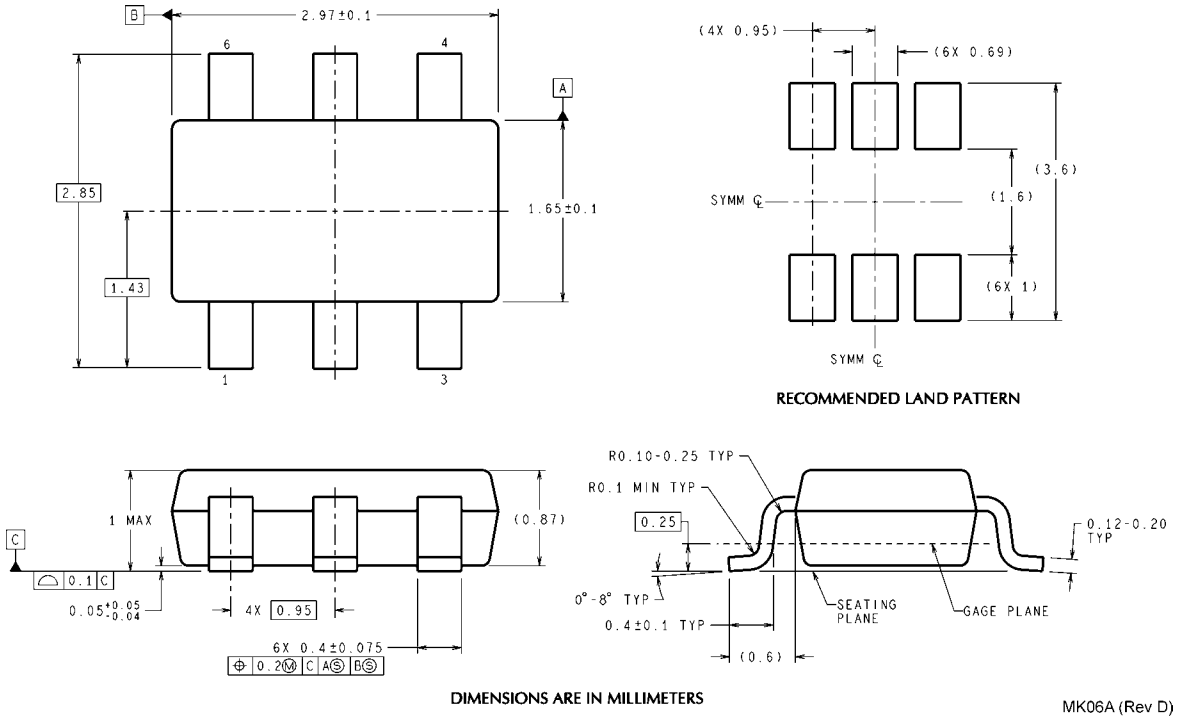


20178960

Pin 1 Indentification

© 2006 National Semiconductor Corporation

Physical Dimensions inches (millimeters) unless otherwise noted



6-Lead TSOT Package
NS Package Number MK06A

National does not assume any responsibility for use of any circuitry described, no circuit patent licenses are implied and National reserves the right at any time without notice to change said circuitry and specifications.

For the most current product information visit us at www.national.com.

LIFE SUPPORT POLICY

NATIONAL'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT AND GENERAL COUNSEL OF NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, and whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury to the user.
2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

BANNED SUBSTANCE COMPLIANCE

National Semiconductor follows the provisions of the Product Stewardship Guide for Customers (CSP-9-111C2) and Banned Substances and Materials of Interest Specification (CSP-9-111S2) for regulatory environmental compliance. Details may be found at: www.national.com/quality/green.

Lead free products are RoHS compliant.

National Semiconductor
Americas Customer
Support Center
Email: new.feedback@nsc.com
Tel: 1-800-272-9959

www.national.com

National Semiconductor
Europe Customer Support Center
Fax: +49 (0) 180-530 85 86
Email: europe.support@nsc.com
Deutsch Tel: +49 (0) 69 9508 6208
English Tel: +44 (0) 870 24 0 2171
Français Tel: +33 (0) 1 41 91 8790

National Semiconductor
Asia Pacific Customer
Support Center
Email: ap.support@nsc.com

National Semiconductor
Japan Customer Support Center
Fax: 81-3-5639-7507
Email: jpn.feedback@nsc.com
Tel: 81-3-5639-7560

PC815 Series

High Sensitivity, High Density Mounting Type Photocoupler

❋ Lead forming type （I type ）and taping reel type （P type ）are also available.（**PC815I/PC815P** ）
❋❋ TÜV （VDE0884 ）approved type is also available as an option.

■ Features

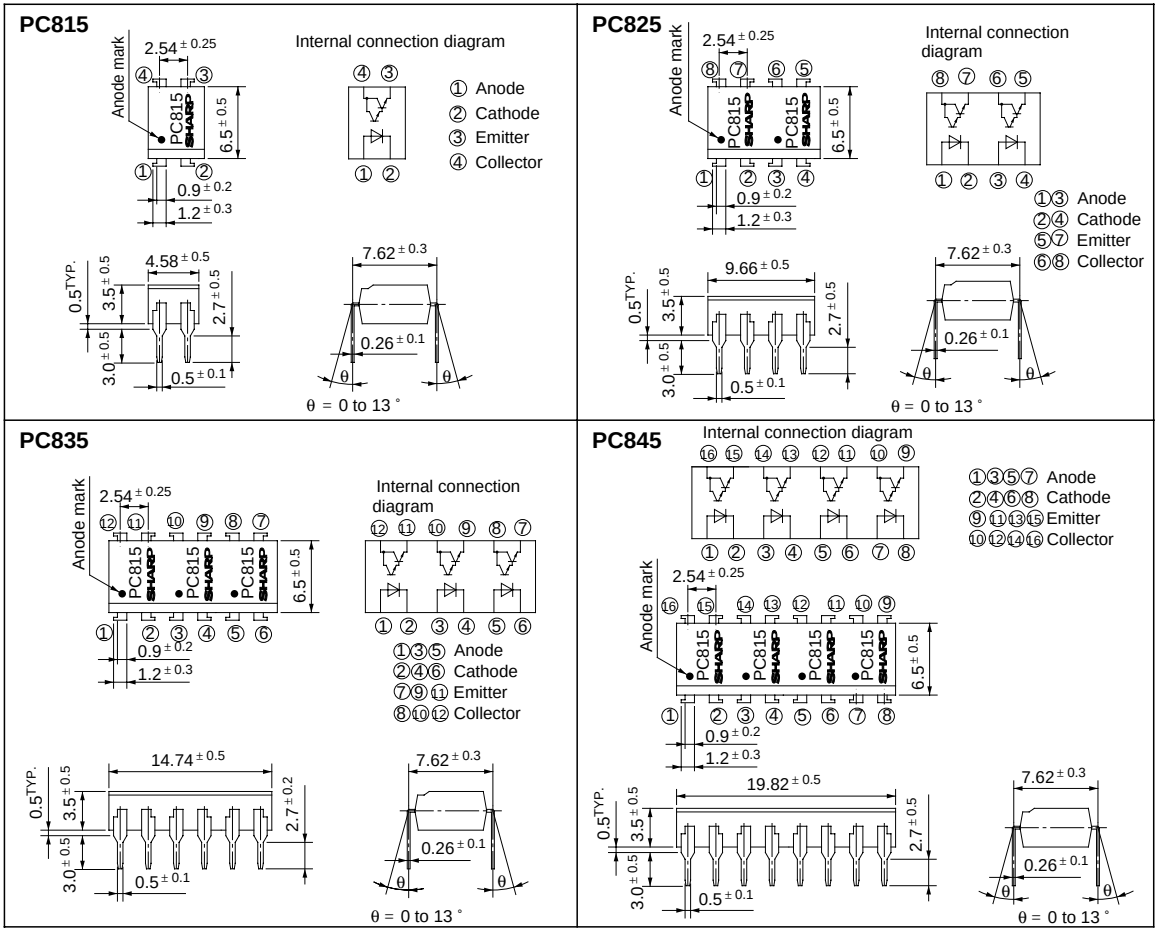
1. High current transfer ratio
（CTR: MIN. 600% at I_F= 1mA, V_{CE} = 2V）
2. High isolation voltage between input and output
（V_{iso} : 5 000V_{rms}）
3. Compact dual-in-line package
PC815 : 1-channel type **PC825** : 2-channel type
PC835 : 3-channel type **PC845** : 4-channel type
4. Recognized by UL file No. E64380

■ Applications

1. System appliances, measuring instruments
2. Industrial robots
3. Copiers, automatic vending machines
4. Signal transmission between circuits of different potentials and impedances

■ Outline Dimensions

（Unit : mm ）



" In the absence of confirmation by device specification sheets, SHARP takes no responsibility for any defects that occur in equipment using any of SHARP's devices, shown in catalogs, data books, etc. Contact SHARP in order to obtain the latest version of the device specification sheets before using any SHARP's device. "

■ Absolute Maximum Ratings

(Ta= 25˚C)

Parameter		Symbol	Rating	Unit
Input	Forward current	I_F	50	mA
	*1 Peak forward current	I_{FM}	1	A
	Reverse voltage	V_R	6	V
	Power dissipation	P	70	mW
Output	Collector-emitter voltage	V_{CEO}	35	V
	Emitter-collector voltage	V_{ECO}	6	V
	Collector current	I_C	80	mA
	Collector power dissipation	P_C	150	mW
Total power dissipation		P_{tot}	200	mW
*2 Isolation voltage		V_{iso}	5 000	V_{rms}
Operating temperature		T_{opr}	- 30 to + 100	˚C
Storage temperature		T_{stg}	- 55 to + 125	˚C
*3 Soldering temperature		T_{sol}	260	˚C

*1 Pulse width<=100 μ s, Duty ratio : 0.001
*2 40 to 60% RH, AC for 1 minute
*3 For 10 seconds

■ Electro-optical Characteristics

(Ta= 25˚C)

Parameter			Symbol	Conditions	MIN.	TYP.	MAX.	Unit
Input	Forward voltage		V_F	I_F = 20mA	-	1.2	1.4	V
	Peak forward voltage		V_{FM}	I_{FM} = 0.5A	-	-	3.0	V
	Reverse current		I_R	V_R = 4V	-	-	10	μ A
	Terminal capacitance		C_t	V= 0, f= 1kHz	-	30	250	pF
Output	Collector dark current		I_{CEO}	V_{CE} = 10V, I_F = 0	-	-	10^{-6}	A
Transfer characteristics	Current transfer ratio		CTR	I_F = 1mA, V_{CE} = 2V	600	-	7 500	%
	Collector-emitter saturation voltage		$V_{CE(sat)}$	I_F = 20mA, I_C = 5mA	-	0.8	1.0	V
	Isolation resistance		R_{ISO}	DC500V, 40 to 60% RH	5×10^{10}	10^{11}	-	Ω
	Floating capacitance		C_f	V= 0, f= 1MHz	-	0.6	1.0	pF
	Cut-off frequency		f_c	V_{CE} = 2V, I_C = 2mA, R_L = 100Ω	1	6	-	kHz
	Response time	Rise time	t_r	V_{CE} = 2V, I_C = 10mA, R_L = 100Ω	-	60	300	μ s
		Fall time	t_f		-	53	250	μ s

Fig. 1 Forward Current vs. Ambient Temperature

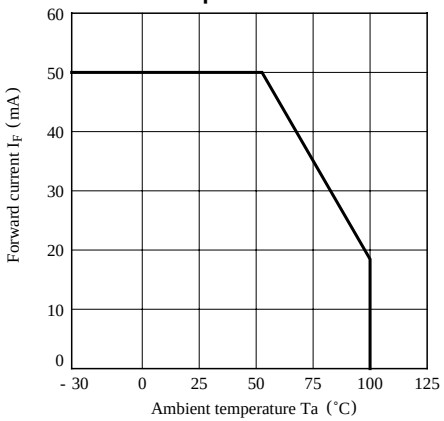


Fig. 2 Collector Power Dissipation vs. Ambient Temperature

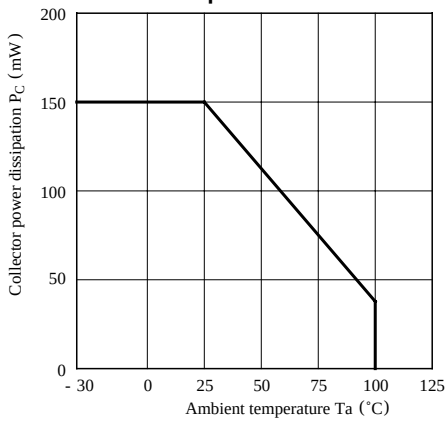


Fig. 3 Peak Forward Current vs. Duty Ratio

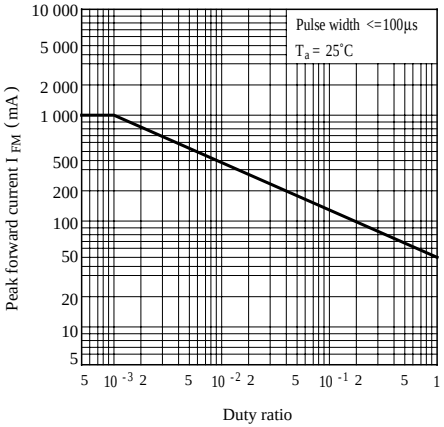


Fig. 4 Forward Current vs. Forward Voltage

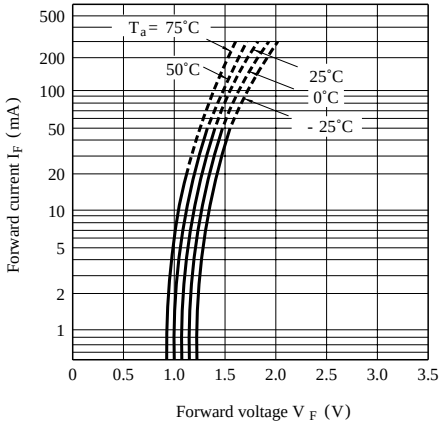


Fig. 5 Current Transfer Ratio vs. Forward Current

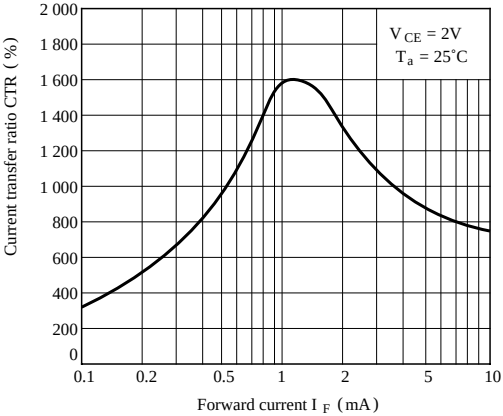


Fig. 6 Collector Current vs. Collector-emitter Voltage

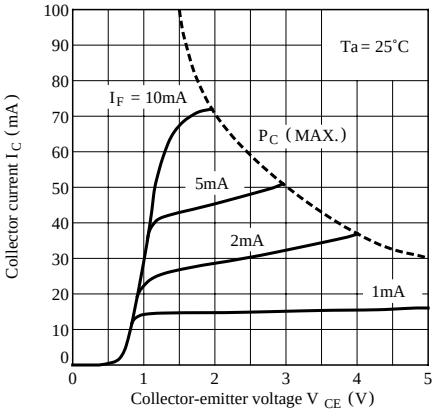


Fig. 7 Relative Current Transfer Ratio vs. Ambient Temperature

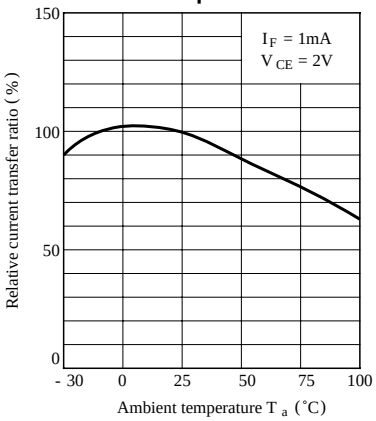


Fig. 8 Collector-emitter Saturation Voltage vs. Ambient Temperature

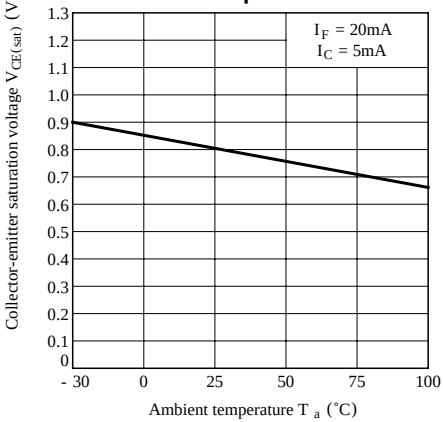


Fig. 9 Collector Dark Current vs. Ambient Temperature

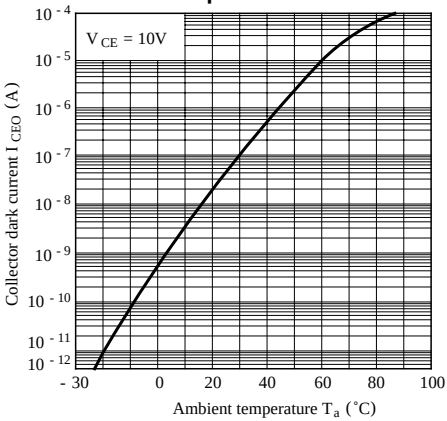


Fig.10 Response Time vs. Load Resistance

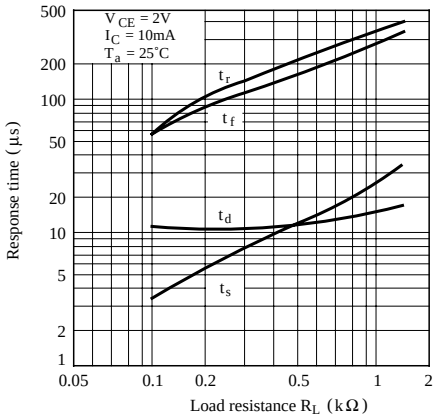
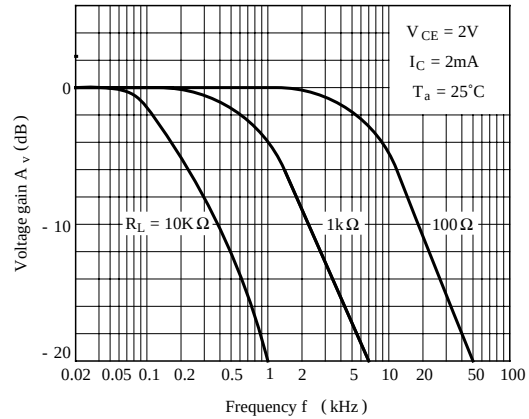


Fig.11 Frequency Response



Test Circuit for Response Time

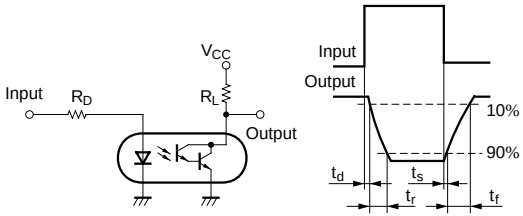
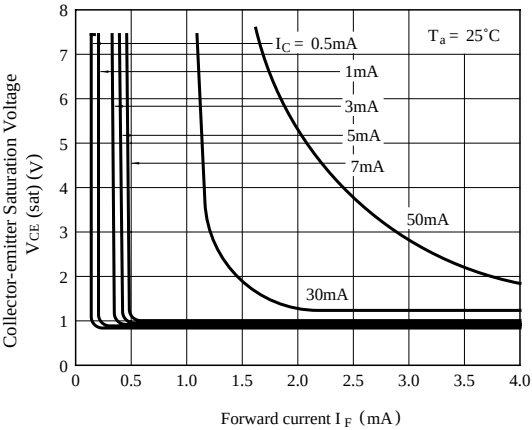
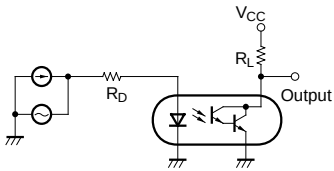


Fig.12 Collector-emitter Saturation Voltage vs. Forward Current



Test Circuit for Frepuency Response



● Please refer to the chapter "Precautions for Use"

MC7800, MC7800A, MC7800AE, NCV7800

1.0 A Positive Voltage Regulators

These voltage regulators are monolithic integrated circuits designed as fixed−voltage regulators for a wide variety of applications including local, on−card regulation. These regulators employ internal current limiting, thermal shutdown, and safe−area compensation. With adequate heatsinking they can deliver output currents in excess of 1.0 A. Although designed primarily as a fixed voltage regulator, these devices can be used with external components to obtain adjustable voltages and currents.

Features

- Output Current in Excess of 1.0 A
- No External Components Required
- Internal Thermal Overload Protection
- Internal Short Circuit Current Limiting
- Output Transistor Safe−Area Compensation
- Output Voltage Offered in 1.5%, 2% and 4% Tolerance
- Available in Surface Mount D^2PAK−3, DPAK−3 and Standard 3−Lead Transistor Packages
- NCV Prefix for Automotive and Other Applications Requiring Unique Site and Control Change Requirements; AEC−Q100 Qualified and PPAP Capable
- These are Pb−Free Devices

MAXIMUM RATINGS (T_A = 25°C, unless otherwise noted)

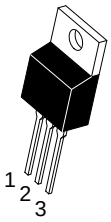
Rating	Symbol	Value			Unit
		369C	221A	936	
Input Voltage (5.0 − 18 V) (24 V)	V_I	35 40			Vdc
Power Dissipation	P_D	Internally Limited			W
Thermal Resistance, Junction−to−Ambient	$R_{\theta JA}$	92	65	Figure 15	°C/W
Thermal Resistance, Junction−to−Case	$R_{\theta JC}$	5.0	5.0	5.0	°C/W
Storage Junction Temperature Range	T_{stg}	−65 to +150			°C
Operating Junction Temperature	T_J	+150			°C

Stresses exceeding those listed in the Maximum Ratings table may damage the device. If any of these limits are exceeded, device functionality should not be assumed, damage may occur and reliability may be affected.

*This device series contains ESD protection and exceeds the following tests:
Human Body Model 2000 V per MIL_STD_883, Method 3015.
Machine Model Method 200 V.

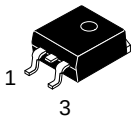
ON Semiconductor®

http://onsemi.com



TO−220
T SUFFIX
CASE 221AB

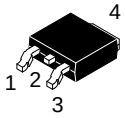
Heatsink surface connected to Pin 2.



Pin 1. Input
2. Ground
3. Output

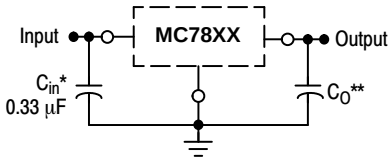
D^2PAK−3
D2T SUFFIX
CASE 936

Heatsink surface (shown as terminal 4 in case outline drawing) is connected to Pin 2.



DPAK−3
DT SUFFIX
CASE 369C

STANDARD APPLICATION



A common ground is required between the input and the output voltages. The input voltage must remain typically 2.0 V above the output voltage even during the low point on the input ripple voltage.

XX, These two digits of the type number indicate nominal voltage.

* C_{in} is required if regulator is located an appreciable distance from power supply filter.

** C_O is not needed for stability; however, it does improve transient response. Values of less than 0.1 μF could cause instability.

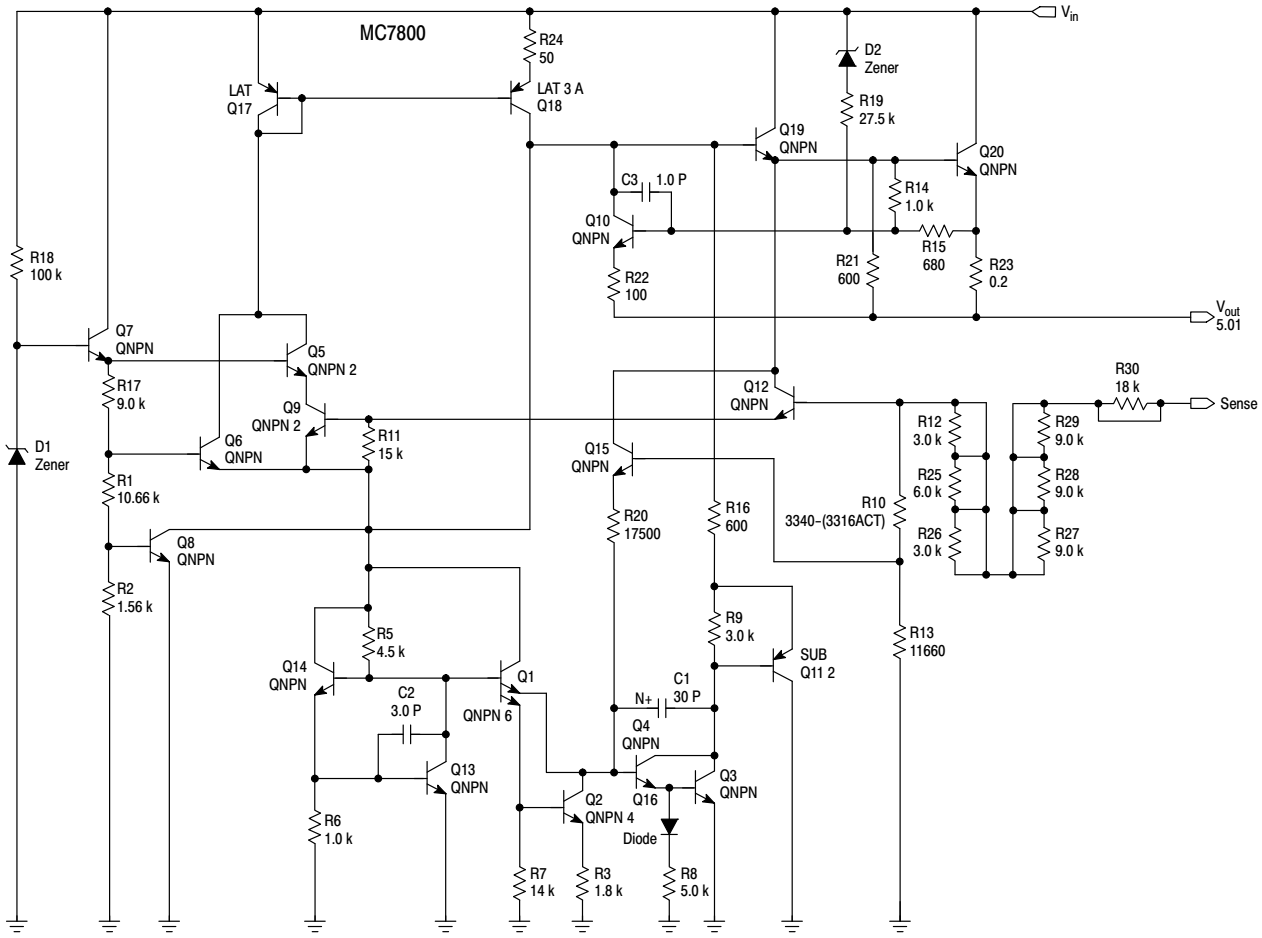
ORDERING INFORMATION

See detailed ordering and shipping information in the package dimensions section on page 23 of this data sheet.

DEVICE MARKING INFORMATION

See general marking information in the device marking section on page 28 of this data sheet.

© Semiconductor Components Industries, LLC, 2014



This device contains 22 active transistors.

Figure 1. Representative Schematic Diagram

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (V_{in} = 10 V, I_O = 500 mA, T_J = T_{low} to 125°C (Note 1), unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	MC7805B, NCV7805B			MC7805C			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Output Voltage (T_J = 25°C)	V_O	4.8	5.0	5.2	4.8	5.0	5.2	Vdc
Output Voltage (5.0 mA ≤ I_O ≤ 1.0 A, P_D ≤ 15 W) 7.0 Vdc ≤ V_{in} ≤ 20 Vdc 8.0 Vdc ≤ V_{in} ≤ 20 Vdc	V_O	 – 4.75	 – 5.0	 – 5.25	 4.75 –	 5.0 –	 5.25 –	Vdc
Line Regulation (Note 4) 7.5 Vdc ≤ V_{in} ≤ 20 Vdc, 1.0 A 8.0 Vdc ≤ V_{in} ≤ 12 Vdc	Reg_{line}	 – –	 5.0 1.3	 100 50	 – –	 0.5 0.8	 20 10	mV
Load Regulation (Note 4) 5.0 mA ≤ I_O ≤ 1.0 A 5.0 mA ≤ I_O ≤ 1.5 A (T_A = 25°C)	Reg_{load}	 – –	 1.3 0.15	 100 50	 – –	 1.3 1.3	 25 25	mV
Quiescent Current	I_B	–	3.2	8.0	–	3.2	6.5	mA
Quiescent Current Change 7.0 Vdc ≤ V_{in} ≤ 25 Vdc 5.0 mA ≤ I_O ≤ 1.0 A (T_A = 25°C)	ΔI_B	 – –	 – –	 – 0.5	 – –	 0.3 0.08	 1.0 0.8	mA
Ripple Rejection 8.0 Vdc ≤ V_{in} ≤ 18 Vdc, f = 120 Hz	RR	 –	 68	 –	 62	 83	 –	dB
Dropout Voltage (I_O = 1.0 A, T_J = 25°C)	$V_I - V_O$	–	2.0	–	–	2.0	–	Vdc
Output Noise Voltage (T_A = 25°C) 10 Hz ≤ f ≤ 100 kHz	V_n	 –	 10	 –	 –	 10	 –	$\mu V/V_O$
Output Resistance f = 1.0 kHz	r_O	–	0.9	–	–	0.9	–	mΩ
Short Circuit Current Limit (T_A = 25°C) V_{in} = 35 Vdc	I_{SC}	 –	 0.2	 –	 –	 0.6	 –	A
Peak Output Current (T_J = 25°C)	I_{max}	–	2.2	–	–	2.2	–	A
Average Temperature Coefficient of Output Voltage	TCV_O	–	−0.3	–	–	−0.3	–	mV/°C

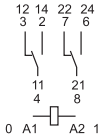
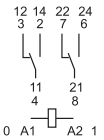
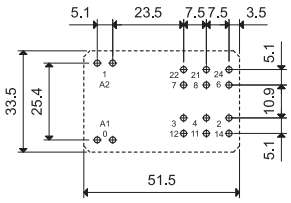
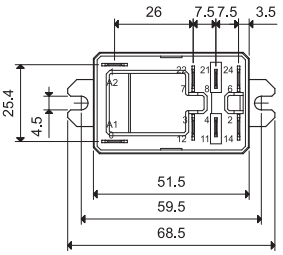
1. T_{low} = 0°C for MC78XXC, MC78XXAC,
   = −40°C for NCV78XX, MC78XXB, MC78XXAB, and MC78XXAEB
2. Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in V_O due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

Features

2 Pole Changeover (DPDT)
30 A Power relay

66.22 PCB connections & mount
66.82 Faston 250 connections
- Flange mount

- Reinforced insulation between coil and contacts according to EN 60335-1; 8 mm creepage and clearance distances
- AC coils & DC coils
- Cadmium Free option available

	66.22	66.82
	• 30 A rated contacts • PCB mount - bifurcated terminals	• 30 A rated contacts • Flange mount • Faston 250 connections
	 	
	 Copper side view	

For outline drawing see page 6

FOR UL RATINGS SEE:
"General technical information" page V

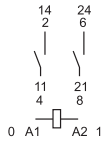
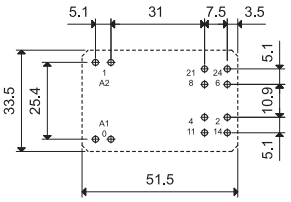
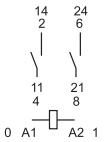
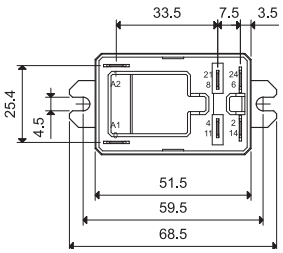
Contact specification			
Contact configuration		2 CO (DPDT)	2 CO (DPDT)
Rated current/Maximum peak current	A	30/50 (NO) - 10/20 (NC)	30/50 (NO) - 10/20 (NC)
Rated voltage/Maximum switching voltage	V AC	250/440	250/440
Rated load AC1	VA	7,500 (NO) - 2,500 (NC)	7,500 (NO) - 2,500 (NC)
Rated load AC15 (230 V AC)	VA	1,200 (NO)	1,200 (NO)
Single phase motor rating (230 V AC)	kW	1.5 (NO)	1.5 (NO)
Breaking capacity DC1: 30/110/220 V	A	25/0.7/0.3 (NO)	25/0.7/0.3 (NO)
Minimum switching load	mW (V/mA)	1,000 (10/10)	1,000 (10/10)
Standard contact material		AgCdO	AgCdO
Coil specification			
Nominal voltage (U_N)	V AC (50/60 Hz)	6 - 12 - 24 - 110/115 - 120/125 - 230 - 240	
	V DC	6 - 12 - 24 - 110 - 125	
Rated power AC/DC	VA (50 Hz)/W	3.6/1.7	3.6/1.7
Operating range	AC	$(0.8...1.1)U_N$	$(0.8...1.1)U_N$
	DC	$(0.8...1.1)U_N$	$(0.8...1.1)U_N$
Holding voltage	AC/DC	0.8 U_N/0.5 U_N	0.8 U_N/0.5 U_N
Must drop-out voltage	AC/DC	0.2 U_N/0.1 U_N	0.2 U_N/0.1 U_N
Technical data			
Mechanical life AC/DC	cycles	$10 \cdot 10^6$	$10 \cdot 10^6$
Electrical life at rated load AC1	cycles	$100 \cdot 10^3$	$100 \cdot 10^3$
Operate/release time	ms	8/15	8/15
Insulation between coil and contacts (1.2/50 µs)	kV	6 (8 mm)	6 (8 mm)
Dielectric strength between open contacts	V AC	1,500	1,500
Ambient temperature range	°C	–40...+70	–40...+70
Environmental protection		RT II	RT II
Approvals (according to type)		CE cULus RINA cULus VDE	

Features

2 Pole NO (DPST-NO)
30 A Power relay

66.22-x300 PCB mount
66.82-x300 Faston 250 connections
- Flange mount

- Reinforced insulation between coil and contacts according to EN 60335-1; 8 mm creepage and clearance distances
- AC coils & DC coils
- Cadmium Free option available

	66.22-x300	66.82-x300
	• 30 A rated contacts • PCB mount - bifurcated terminals	• 30 A rated contacts • Flange mount • Faston 250 connections
	  Copper side view	 

For outline drawing see page 6

FOR UL RATINGS SEE:
"General technical information" page V

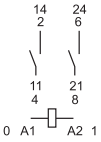
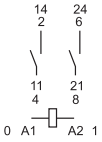
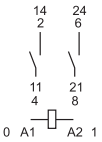
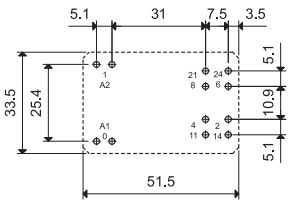
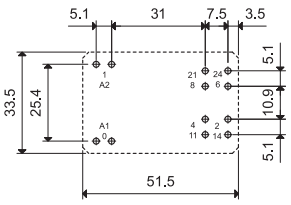
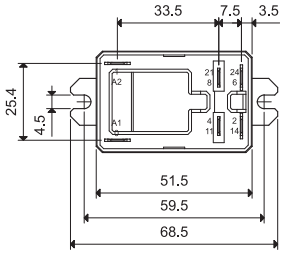
Contact specification			
Contact configuration		2 NO (DPST-NO)	2 NO (DPST-NO)
Rated current/Maximum peak current	A	30/50	30/50
Rated voltage/Maximum switching voltage	V AC	250/440	250/440
Rated load AC1	VA	7,500	7,500
Rated load AC15 (230 V AC)	VA	1,200	1,200
Single phase motor rating (230 V AC)	kW	1.5	1.5
Breaking capacity DC1: 30/110/220 V	A	25/0.7/0.3	25/0.7/0.3
Minimum switching load	mW (V/mA)	1,000 (10/10)	1,000 (10/10)
Standard contact material		AgCdO	AgCdO
Coil specification			
Nominal voltage (U_N)	V AC (50/60 Hz)	6 - 12 - 24 - 110/115 - 120/125 - 230 - 240	
	V DC	6 - 12 - 24 - 110 -125	
Rated power AC/DC	VA (50 Hz)/W	3.6/1.7	3.6/1.7
Operating range	AC	$(0.8...1.1)U_N$	$(0.8...1.1)U_N$
	DC	$(0.8...1.1)U_N$	$(0.8...1.1)U_N$
Holding voltage	AC/DC	0.8 U_N/0.5 U_N	0.8 U_N/0.5 U_N
Must drop-out voltage	AC/DC	0.2 U_N/0.1 U_N	0.2 U_N/0.1 U_N
Technical data			
Mechanical life AC/DC	cycles	$10 \cdot 10^6$	$10 \cdot 10^6$
Electrical life at rated load AC1	cycles	$100 \cdot 10^3$	$100 \cdot 10^3$
Operate/release time	ms	8/10	8/10
Insulation between coil and contacts (1.2/50 µs)	kV	6 (8 mm)	6 (8 mm)
Dielectric strength between open contacts	V AC	1,500	1,500
Ambient temperature range	°C	–40...+70	–40...+70
Environmental protection		RT II	RT II
Approvals (according to type)		CE EAC RINA cULus VDE	

Features

2 Pole NO (DPST-NO), ≥1.5mm contact gap
30 A Power relay

66.22-x600 **PCB mount**
66.22-x600S **PCB mount - 5 mm gap between PCB and relay base**
66.82-x600 **Faston 250 connections - Flange mount**

- ≥1.5 mm contact gap (according to VDE 0126-1-1 for solar inverter applications)
- Reinforced insulation between coil and contacts according to EN 60335-1; 8 mm creepage and clearance distances
- Wash tight version (RT III) available
- DC coils
- Cadmium Free option available

	NEW 66.22-x600	NEW 66.22-x600S	NEW 66.82-x600
	• PCB mount - bifurcated terminals	• PCB mount - bifurcated terminals • 5 mm gap between PCB and relay base	• Flange mount • Faston 250 connections
			
			
	Copper side view	Copper side view	

For outline drawing see page 6

FOR UL RATINGS SEE:
"General technical information" page V

Contact specification				
Contact configuration			2 NO (DPST-NO)	2 NO (DPST-NO)	2 NO (DPST-NO)
Rated current/Maximum peak current	A		30/50	30/50	30/50
Rated voltage/Maximum switching voltage	V AC		250/440	250/440	250/440
Rated load AC1	VA		7,500	7,500	7,500
Rated load AC15 (230 V AC)	VA		1,200	1,200	1,200
Single phase motor rating (230 V AC)	kW		1.5	1.5	1.5
Breaking capacity DC1: 30/110/220 V	A		30/1.2/0.5	30/1.2/0.5	30/1.2/0.5
Minimum switching load	mW (V/mA)		1,000 (10/10)	1,000 (10/10)	1,000 (10/10)
Standard contact material			AgCdO	AgCdO	AgCdO
Coil specification				
Nominal voltage (U_N)	V AC (50/60 Hz)		—	
	V DC		6 - 12 - 24 - 110 -125	
Rated power AC/DC	VA (50 Hz)/W		—/1.7	—/1.7	—/1.7
Operating range	AC		—	—	—
	DC		(0.8...1.1)U_N	(0.7...1.1)U_N	(0.8...1.1)U_N
Holding voltage	AC/DC		—/0.5 U_N	—/0.5 U_N	—/0.5 U_N
Must drop-out voltage	AC/DC		—/0.1 U_N	—/0.1 U_N	—/0.1 U_N
Technical data				
Mechanical life	cycles		$10 \cdot 10^6$	$10 \cdot 10^6$	$10 \cdot 10^6$
Electrical life at rated load AC1	cycles		$100 \cdot 10^3$	$100 \cdot 10^3$	$100 \cdot 10^3$
Operate/release time	ms		15/4	15/4	15/4
Insulation between coil and contacts (1.2/50 µs)	kV		6 (8 mm)	6 (8 mm)	6 (8 mm)
Dielectric strength between open contacts	V AC		2,500	2,500	2,500
Ambient temperature range	°C		–40...+70	–40...+70	–40...+70
Environmental protection			RT II	RT II	RT II
Approvals (according to type)				

Ordering information

Example: 66 series relay, Faston 250 (6.3x0.8 mm) with top flange mount, 2 CO (DPDT) 30 A contacts, 24 V DC coil.

								A	B	C	D			
6	6	.	8	2	.	9	.	0	2	4	.	0	0	0	0	

Series

Type
2 = PCB
8 = Faston 250 (6.3x0.8 mm) with top flange mount

No. of poles
2 = 2 pole, 30 A

Coil version
8 = AC (50/60 Hz)
9 = DC

Coil voltage
See coil specifications

A: Contact material
0 = Standard AgCdO
1 = AgNi

B: Contact circuit
0 = CO (nPDT)
3 = NO (nPST)
6 = NO (nPST), ≥1.5 mm contact gap

C: Options
0 = None

D: Special versions
0 = Standard
1 = Wash tight (RT III)

S = PCB version with 5 mm gap between PCB and relay base (only 66.22)

Selecting features and options: only combinations in the same row are possible.
Preferred selections for best availability are shown in **bold.**

Type	Coil version	A	B	C	D
66.22	AC-DC	**0** - 1	**0** - 3	**0**	0 - **1**
	DC	**0** - 1	**6**	**0**	0 - **1**
66.22....S	DC	**0** - 1	**6**	**0**	0 - **1**
66.82	AC-DC	**0** - 1	**0** - 3	**0**	**0** - 1
	DC	**0** - 1	**6**	**0**	**0** - 1

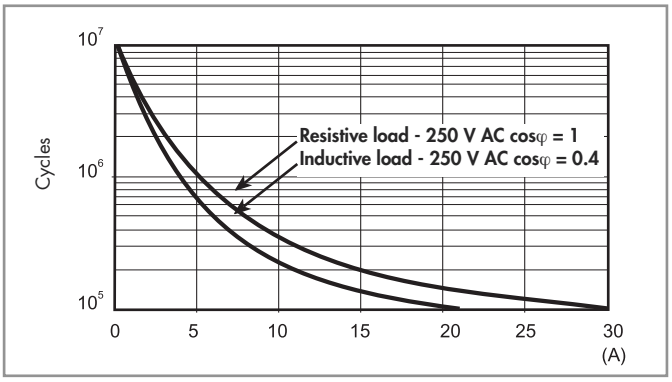
Technical data

Insulation according to EN 61810-1				
Nominal voltage of supply system		V AC	230/400	
Rated insulation voltage		V AC	400	
Pollution degree			3	
Insulation between coil and contact set				
Type of insulation			Reinforced (8 mm)	
Overvoltage category			III	
Rated impulse voltage		kV (1.2/50 µs)	6	
Dielectric strength		V AC	4,000	
Insulation between adjacent contacts				
Type of insulation			Basic	
Overvoltage category			III	
Rated impulse voltage		kV (1.2/50 µs)	4	
Dielectric strength		V AC	2,500	
Insulation between open contacts			**2 CO**	**2 NO, ≥1.5mm (x600 version)**
Type of disconnection			Micro-disconnection	Full-disconnection *
Overvoltage category			—	II
Rated impulse voltage		kV (1.2/50 µs)	—	2.5
Dielectric strength		V AC/kV (1.2/50 µs)	1,500/2	2,500/3
Conducted disturbance immunity				
Burst (5...50)ns, 5 kHz, on A1 - A2			EN 61000-4-4	level 4 (4 kV)
Surge (1.2/50 µs) on A1 - A2 (differential mode)			EN 61000-4-5	level 4 (4 kV)
Other data				
Bounce time: NO/NC		ms	7/10	
Vibration resistance (10...150)Hz: NO/NC		g	20/19	
Shock resistance		g	20	
Power lost to the environment	without contact current	W	2.3	
	with rated current	W	5	
Recommended distance between relays mounted on PCB		mm	≥ 10	

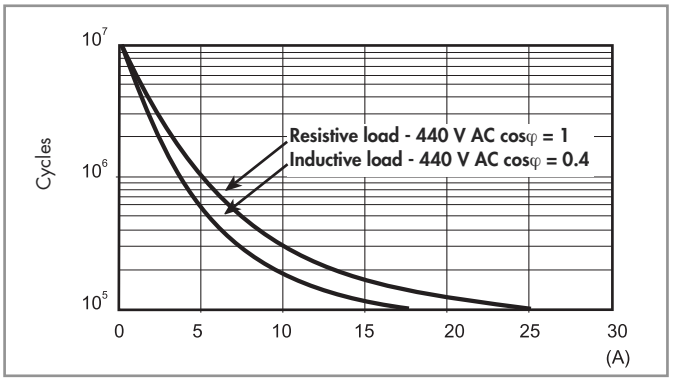
* Only in applications where over voltage category II is permitted. In applications of over voltage category III: Micro-disconnection.

Contact specification

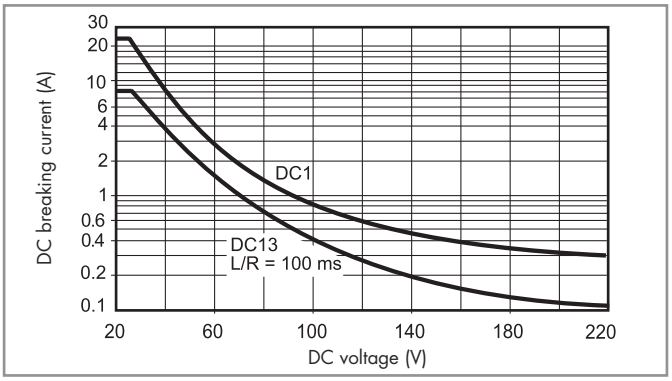
F 66 - Electrical life (AC) v contact current
250 V (normally open contact)



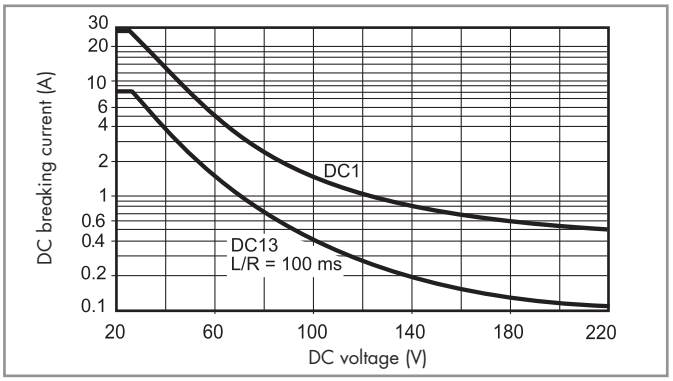
F 66 - Electrical life (AC) v contact current
440 V (normally open contact)



H 66 - Maximum DC breaking capacity



H 66 - Maximum DC breaking capacity, x600 versions (>1.5mm contact gap)



- When switching a resistive load (DC1) having voltage and current values under the curve, an electrical life of ≥ $100 \cdot 10^3$ can be expected.
- In the case of DC13 loads, the connection of a diode in parallel with the load will permit a similar electrical life as for a DC1 load.
  Note: the release time for the load will be increased.

Coil specifications

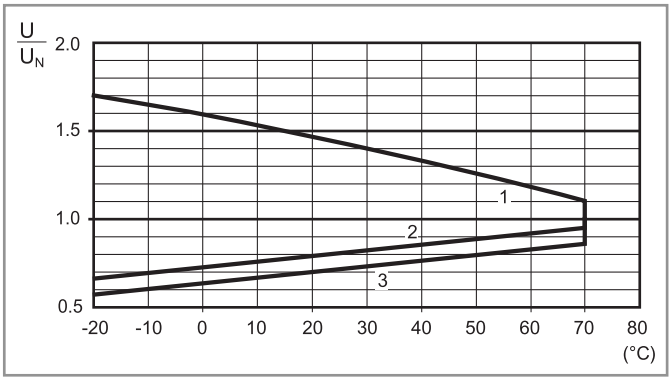
DC coil data

Nominal voltage U_N	Coil code	Operating range U_{min}	Operating range U_{max}	Resistance R	Rated coil consumption I at U_N
V		V	V	Ω	mA
6	**9**.006	4.8	6.6	21	283
12	**9**.012	9.6	13.2	85	141
24	**9**.024	19.2	26.4	340	70.5
110	**9**.110	88	121	7,000	15.7
125	**9**.125	100	138	9,200	13.6

AC coil data

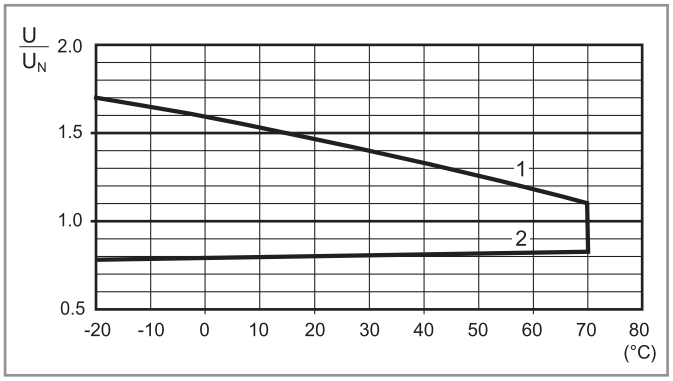
Nominal voltage U_N	Coil code	Operating range U_{min}	Operating range U_{max}	Resistance R	Rated coil consumption I at U_N (50Hz)
V		V	V	Ω	mA
6	**8**.006	4.8	6.6	3	600
12	**8**.012	9.6	13.2	11	300
24	**8**.024	19.2	26.4	50	150
110/115	**8**.110	88	126	930	32.6
120/125	**8**.120	96	137	1,050	30
230	**8**.230	184	253	4,000	15.7
240	**8**.240	192	264	5,500	15

R 66 - DC coil operating range v ambient temperature



1 - Max. permitted coil voltage.
2 - Min. pick-up voltage with coil at ambient temperature.
3 - Min. pick-up voltage with coil at ambient temperature (66.22-x600S).

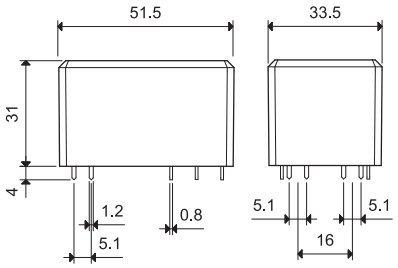
R 66 - AC coil operating range v ambient temperature



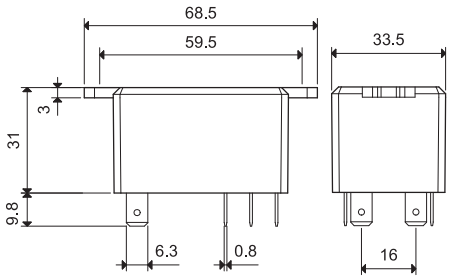
1 - Max. permitted coil voltage.
2 - Min. pick-up voltage with coil at ambient temperature.

Outline drawings

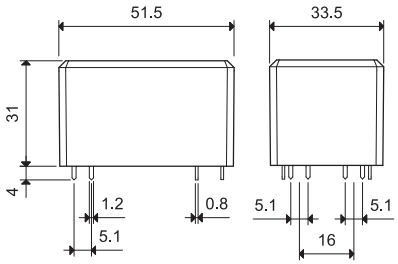
Type 66.22



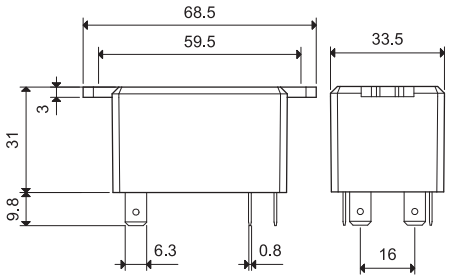
Type 66.82



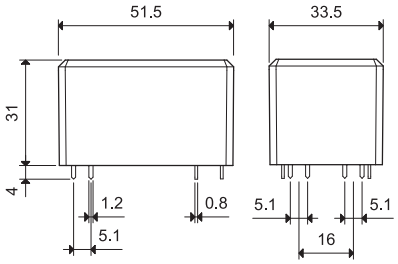
Type 66.22-0300



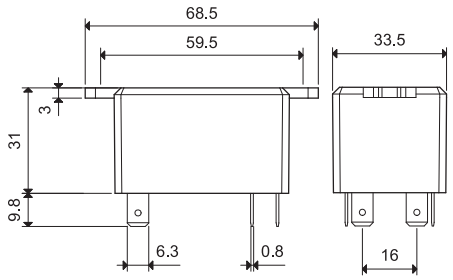
Type 66.82-0300



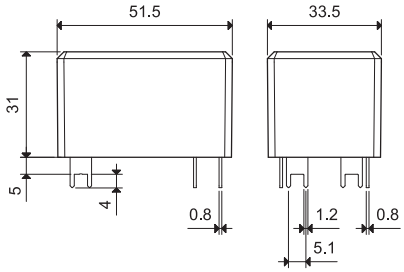
Type 66.22-0600



Type 66.82-0600



Type 66.22-0600S

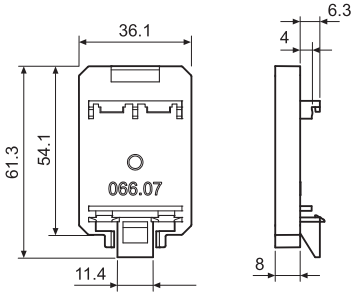


Accessories

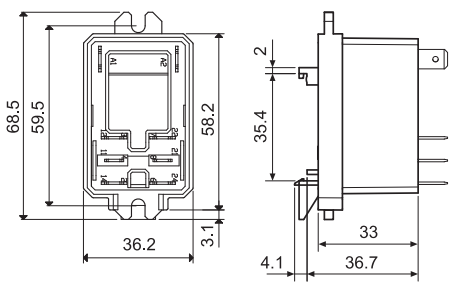
066.07

066.07 with relay

Top 35 mm rail (EN 60715) mount for types 66.82.xxxx.0x00	066.07



066.07



066.07 with relay

International
IOR Rectifier

AUTOMOTIVE MOSFET

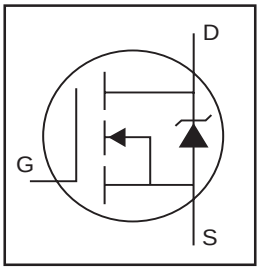
PD - 96040

IRF1404ZPbF
IRF1404ZSPbF
IRF1404ZLPbF

HEXFET® Power MOSFET

Features

- Advanced Process Technology
- Ultra Low On-Resistance
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Repetitive Avalanche Allowed up to Tjmax
- Lead-Free



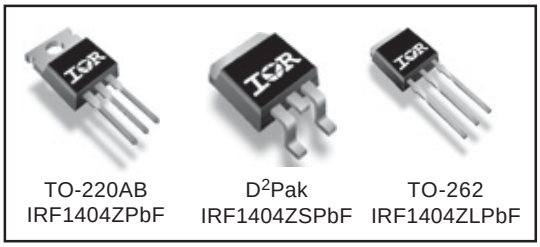
V_{DSS} = 40V

$R_{DS(on)}$ = 3.7mΩ

I_D = 75A

Description

Specifically designed for Automotive applications, this HEXFET® Power MOSFET utilizes the latest processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. Additional features of this design are a 175°C junction operating temperature, fast switching speed and improved repetitive avalanche rating . These features combine to make this design an extremely efficient and reliable device for use in Automotive applications and a wide variety of other applications.



TO-220AB	D^2Pak	TO-262
IRF1404ZPbF	IRF1404ZSPbF	IRF1404ZLPbF

Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
I_D @ T_C = 25°C	Continuous Drain Current, V_{GS} @ 10V (Silicon Limited)	180	A
I_D @ T_C = 100°C	Continuous Drain Current, V_{GS} @ 10V	120	
I_D @ T_C = 25°C	Continuous Drain Current, V_{GS} @ 10V (Package Limited)	75	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①	710	
P_D @T_C = 25°C	Power Dissipation	200	W
	Linear Derating Factor	1.3	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
E_{AS} (Thermally limited)	Single Pulse Avalanche Energy②	330	mJ
E_{AS} (Tested)	Single Pulse Avalanche Energy Tested Value ⑥	480	
I_{AR}	Avalanche Current ①	See Fig.12a, 12b, 15, 16	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy ⑤		mJ
T_J T_{STG}	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to + 175	°C
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
	Mounting Torque, 6-32 or M3 screw ⑦	10 lbf•in (1.1N•m)	

Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	——	0.75 ⑨	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat Greased Surface ⑦	0.50	——	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient ⑦	——	62	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient (PCB Mount) ⑧	——	40	

Electrical Characteristics @ T_J = 25°C (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	40	—	—	V	V_{GS} = 0V, I_D = 250µA
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.033	—	V/°C	Reference to 25°C, I_D = 1mA
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	2.7	3.7	mΩ	V_{GS} = 10V, I_D = 75A ③
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250µA
gfs	Forward Transconductance	170	—	—	V	V_{DS} = 25V, I_D = 75A
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	20	µA	V_{DS} = 40V, V_{GS} = 0V
		—	—	250		V_{DS} = 40V, V_{GS} = 0V, T_J = 125°C
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	200	nA	V_{GS} = 20V
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-200		V_{GS} = -20V
Q_g	Total Gate Charge	—	100	150		I_D = 75A
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	31	—	nC	V_{DS} = 32V
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	42	—		V_{GS} = 10V ③
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	18	—		V_{DD} = 20V
t_r	Rise Time	—	110	—		I_D = 75A
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	36	—	ns	R_G = 3.0 Ω
t_f	Fall Time	—	58	—		V_{GS} = 10V ③
L_D	Internal Drain Inductance	—	4.5	—		Between lead,
					nH	6mm (0.25in.)
L_S	Internal Source Inductance	—	7.5	—		from package
						and center of die contact
C_{iss}	Input Capacitance	—	4340	—		V_{GS} = 0V
C_{oss}	Output Capacitance	—	1030	—		V_{DS} = 25V
C_{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	550	—	pF	f = 1.0MHz
C_{oss}	Output Capacitance	—	3300	—		V_{GS} = 0V, V_{DS} = 1.0V, f = 1.0MHz
C_{oss}	Output Capacitance	—	920	—		V_{GS} = 0V, V_{DS} = 32V, f = 1.0MHz
C_{oss} eff.	Effective Output Capacitance	—	1350	—		V_{GS} = 0V, V_{DS} = 0V to 32V ④

Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
I_S	Continuous Source Current	—	—	75		MOSFET symbol
	(Body Diode)				A	showing the
I_{SM}	Pulsed Source Current	—	—	750		integral reverse
	(Body Diode) ①					p-n junction diode.
V_{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	1.3	V	T_J = 25°C, I_S = 75A, V_{GS} = 0V ③
t_{rr}	Reverse Recovery Time	—	28	42	ns	T_J = 25°C, I_F = 75A, V_{DD} = 20V
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	—	34	51	nC	di/dt = 100A/µs ③
t_{on}	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by LS+LD)				

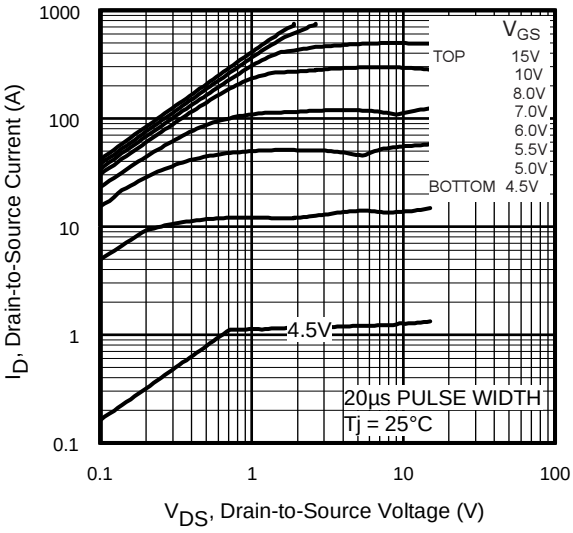


Fig 1. Typical Output Characteristics

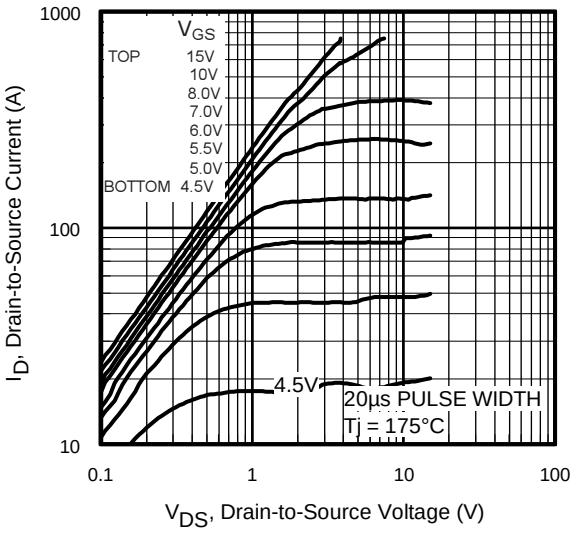


Fig 2. Typical Output Characteristics

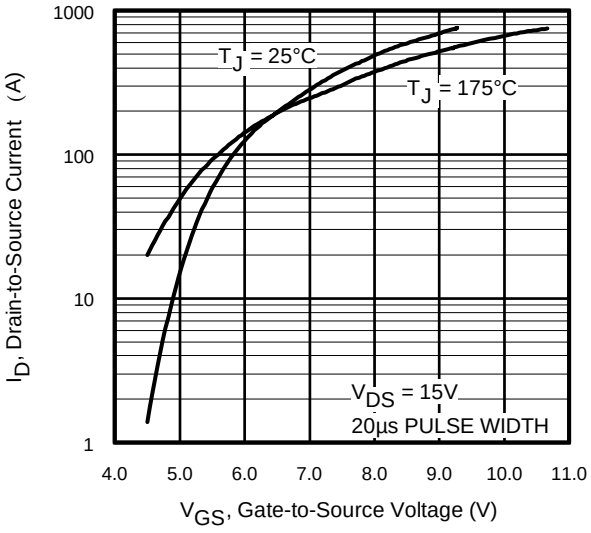


Fig 3. Typical Transfer Characteristics

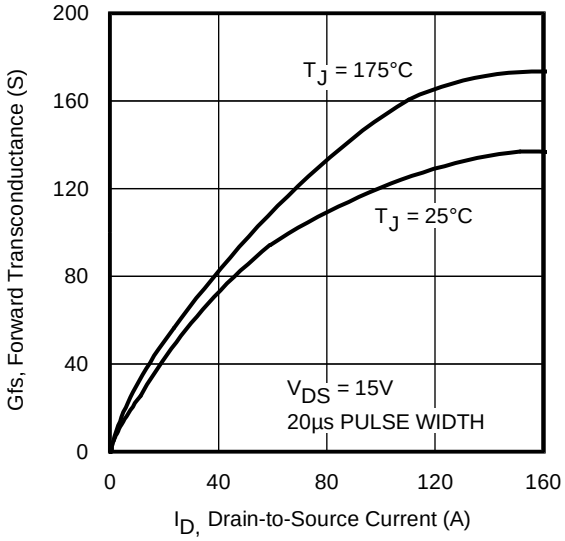


Fig 4. Typical Forward Transconductance Vs. Drain Current

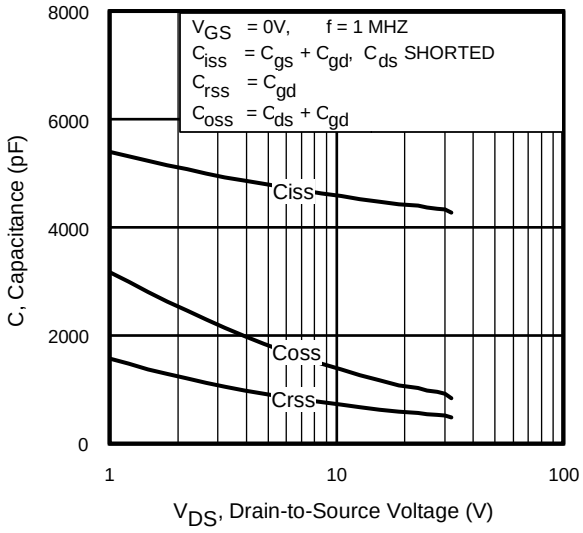


Fig 5. Typical Capacitance Vs. Drain-to-Source Voltage

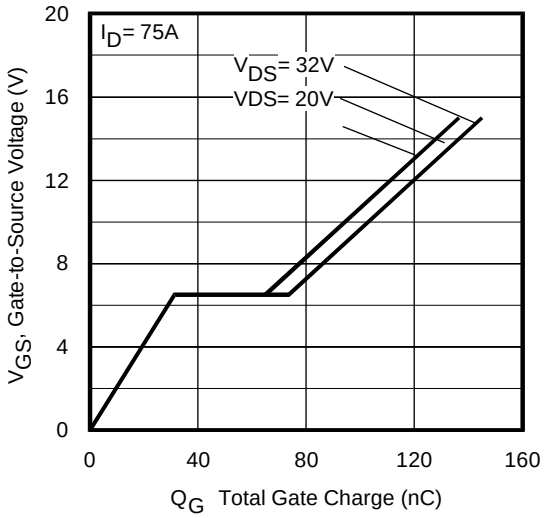


Fig 6. Typical Gate Charge Vs. Gate-to-Source Voltage

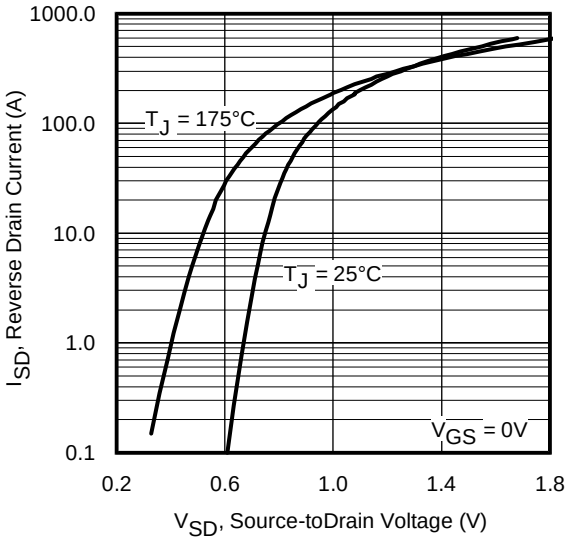


Fig 7. Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

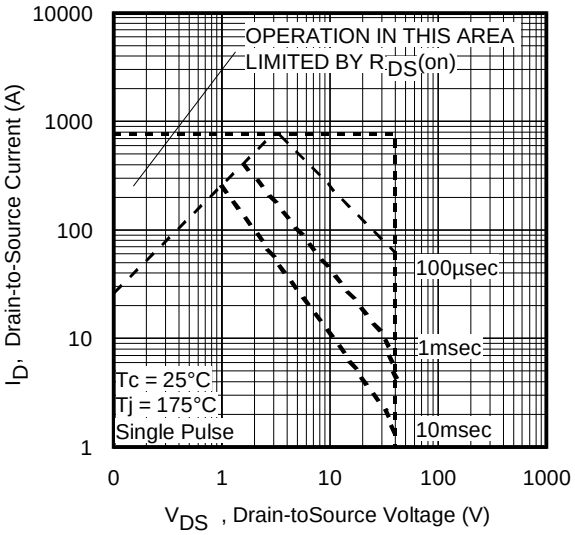


Fig 8. Maximum Safe Operating Area

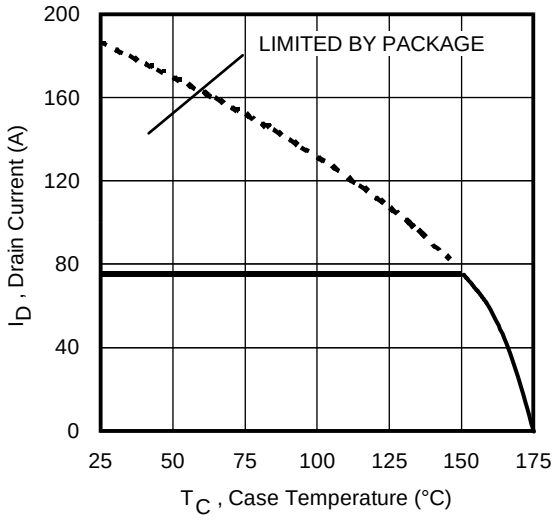


Fig 9. Maximum Drain Current Vs. Case Temperature

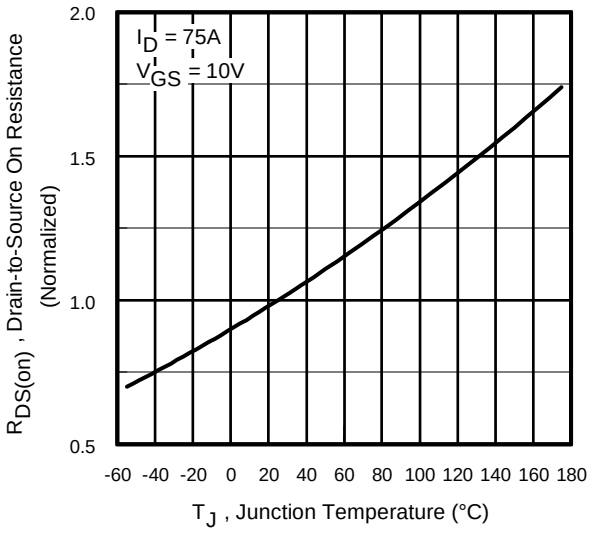

I D = 75A
V GS = 10V
2.0
1.5
1.0
0.5
-60 -40 -20 0 20 40 60 80 100 120 140 160 180
R DS(on) , Drain-to-Source On Resistance (Normalized)
T J , Junction Temperature (°C)

Fig 10. Normalized On-Resistance Vs. Temperature

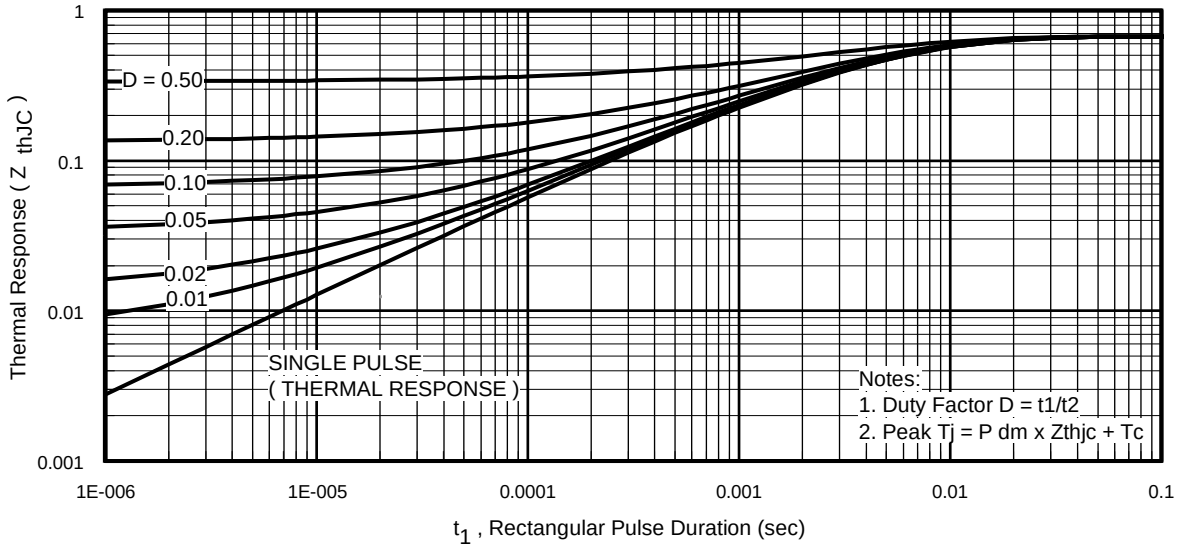


Fig 11. Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

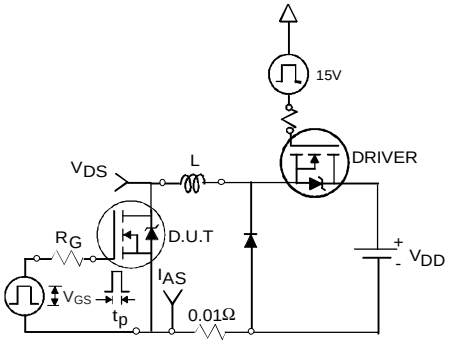


Fig 12a. Unclamped Inductive Test Circuit

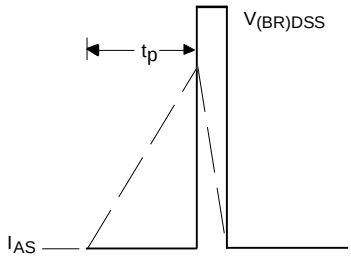


Fig 12b. Unclamped Inductive Waveforms

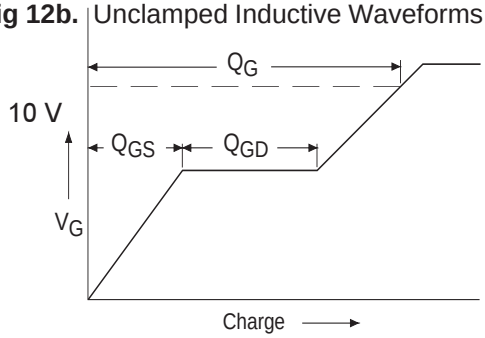


Fig 13a. Basic Gate Charge Waveform

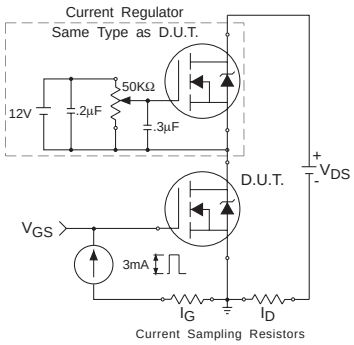


Fig 13b. Gate Charge Test Circuit

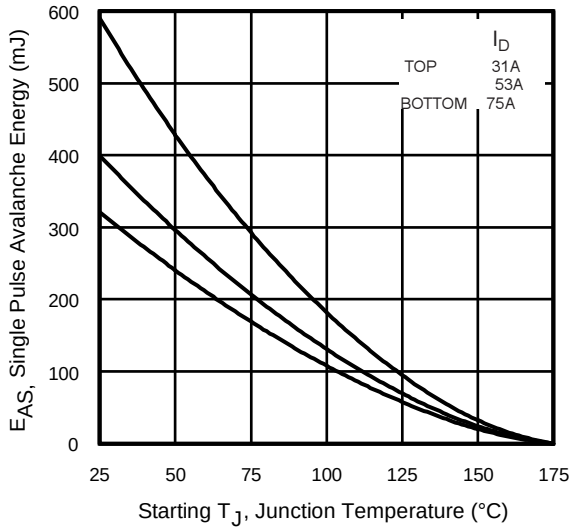


Fig 12c. Maximum Avalanche Energy Vs. Drain Current

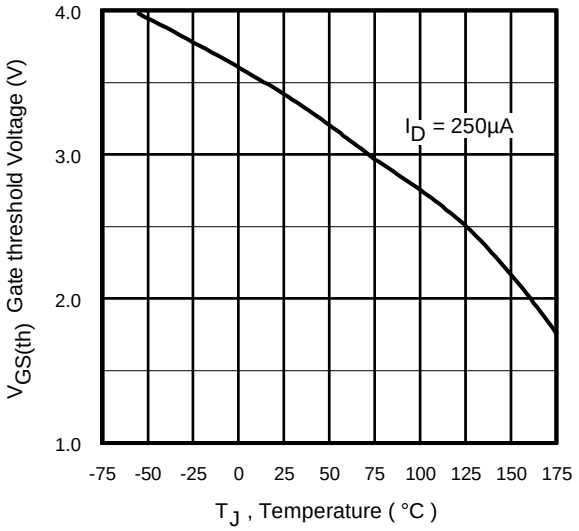


Fig 14. Threshold Voltage Vs. Temperature

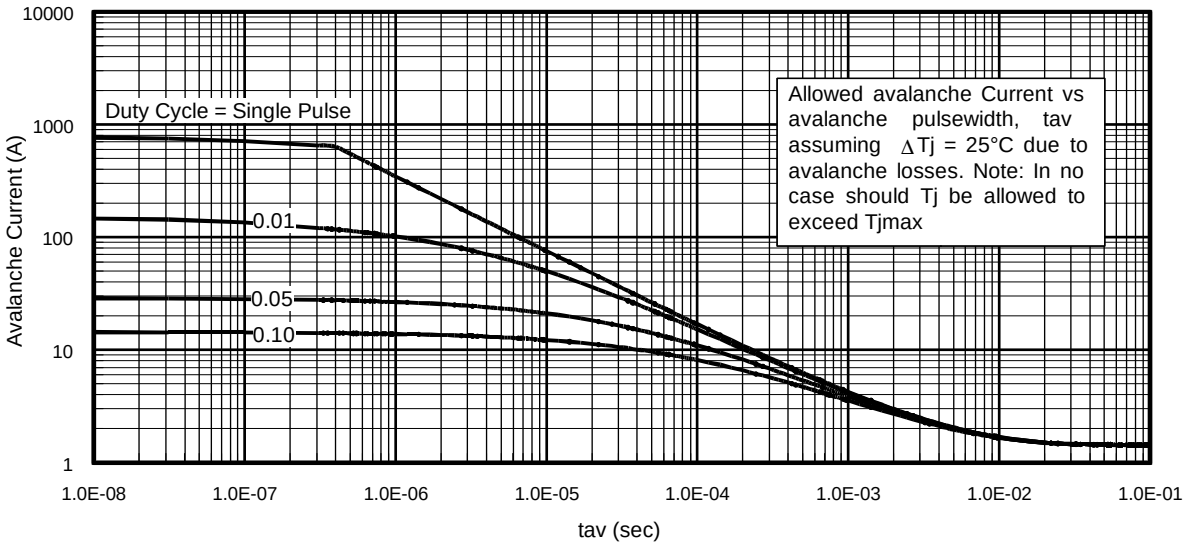


Fig 15. Typical Avalanche Current Vs.Pulsewidth

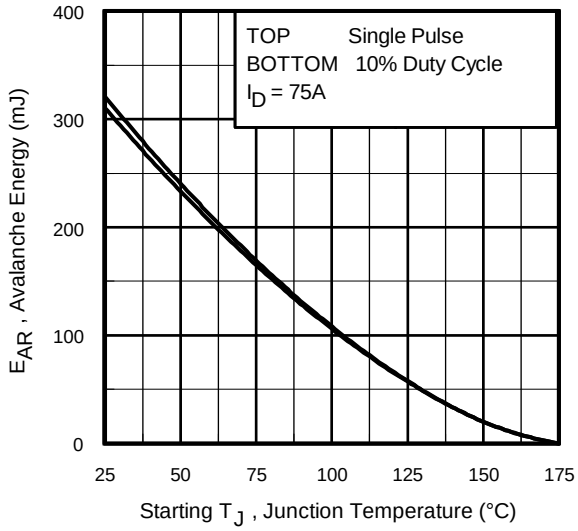


Fig 16. Maximum Avalanche Energy Vs. Temperature

Notes on Repetitive Avalanche Curves , Figures 15, 16: (For further info, see AN-1005 at www.irf.com)

1. Avalanche failures assumption: Purely a thermal phenomenon and failure occurs at a temperature far in excess of T_{jmax}. This is validated for every part type.
2. Safe operation in Avalanche is allowed as long asT_{jmax} is not exceeded.
3. Equation below based on circuit and waveforms shown in Figures 12a, 12b.
4. $P_{D\ (ave)}$ = Average power dissipation per single avalanche pulse.
5. BV = Rated breakdown voltage (1.3 factor accounts for voltage increase during avalanche).
6. I_{av} = Allowable avalanche current.
7. ΔT = Allowable rise in junction temperature, not to exceed T_{jmax} (assumed as 25°C in Figure 15, 16).
   t_{av} = Average time in avalanche.
   D = Duty cycle in avalanche = $t_{av} \cdot f$
   $Z_{thJC}(D, t_{av})$ = Transient thermal resistance, see figure 11)

$$P_{D\ (ave)} = 1/2\ (\ 1.3 \cdot BV \cdot I_{av}) = \Delta T / Z_{thJC}$$
$$I_{av} = 2\Delta T / [1.3 \cdot BV \cdot Z_{th}]$$
$$E_{AS\ (AR)} = P_{D\ (ave)} \cdot t_{av}$$

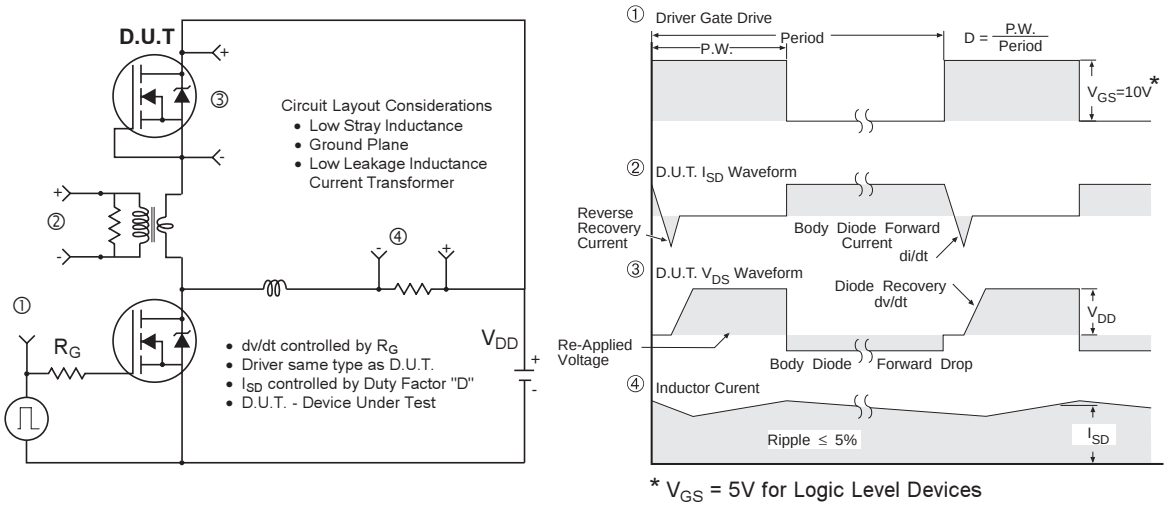


Fig 17. Peak Diode Recovery dv/dt Test Circuit for N-Channel HEXFET® Power MOSFETs

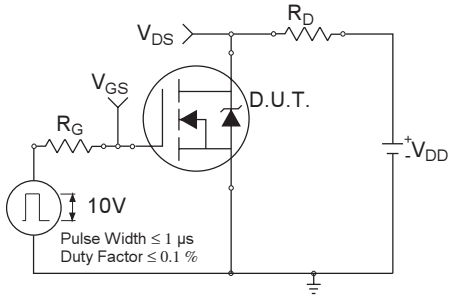


Fig 18a. Switching Time Test Circuit

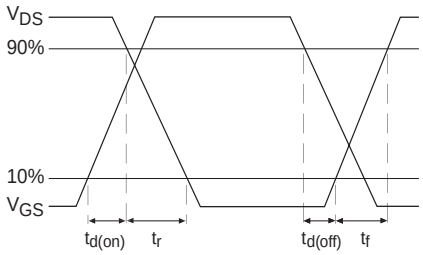
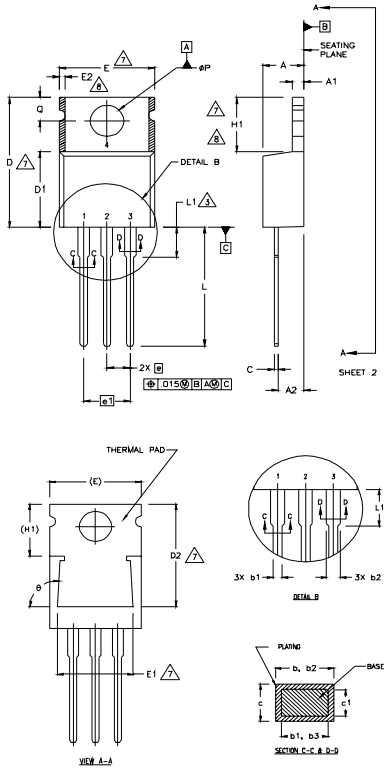


Fig 18b. Switching Time Waveforms

TO-220AB Package Outline

Dimensions are shown in millimeters (inches)



NOTES:

1 DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ASME Y14.5 M- 1994.
2 DIMENSIONS ARE SHOWN IN INCHES [MILLIMETERS].
3 LEAD DIMENSION AND FINISH UNCONTROLLED IN L1.
4 DIMENSION D & E DO NOT INCLUDE MOLD FLASH. MOLD FLASH SHALL NOT EXCEED .005" (0.127) PER SIDE. THESE DIMENSIONS ARE MEASURED AT THE OUTERMOST EXTREMES OF THE PLASTIC BODY.
5 DIMENSION b1 & c1 APPLY TO BASE METAL ONLY.
6 CONTROLLING DIMENSION : INCHES.
7 THERMAL PAD CONTOUR OPTIONAL WITHIN DIMENSIONS E,H1,D2 & E1
8 DIMENSION E2 X H1 DEFINE A ZONE WHERE STAMPING AND SINGULATION IRREGULARITIES ARE ALLOWED.

SYMBOL	DIMENSIONS				NOTES
	MILLIMETERS		INCHES		
	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	
A	3.56	4.82	.140	.190	
A1	0.51	1.40	.020	.055	
A2	2.04	2.92	.080	.115	
b	0.38	1.01	.015	.040	
b1	0.38	0.96	.015	.038	5
b2	1.15	1.77	.045	.070	
b3	1.15	1.73	.045	.068	
c	0.36	0.61	.014	.024	
c1	0.36	0.56	.014	.022	5
D	14.22	16.51	.560	.650	4
D1	8.38	9.02	.330	.355	
D2	12.19	12.88	.480	.507	7
E	9.66	10.66	.380	.420	4,7
E1	8.38	8.89	.330	.350	7
e	2.54 BSC		.100 BSC		
e1	5.08		.200 BSC		
H1	5.85	6.55	.230	.270	7,8
L	12.70	14.73	.500	.580	
L1	–	6.35	–	.250	3
øP	3.54	4.08	.139	.161	
Q	2.54	3.42	.100	.135	
ø	90°-93°		90°-93°		

LEAD ASSIGNMENTS

HEXFET
1.- GATE
2.- DRAIN
3.- SOURCE

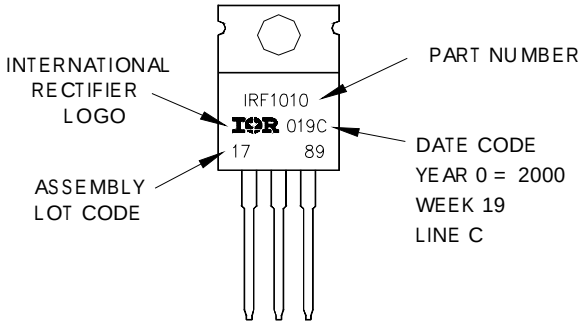
IGBTs, CoPACK
1.- GATE
2.- COLLECTOR
3.- EMITTER

DIODES
1.- ANODE/OPEN
2.- CATHODE
3.- ANODE

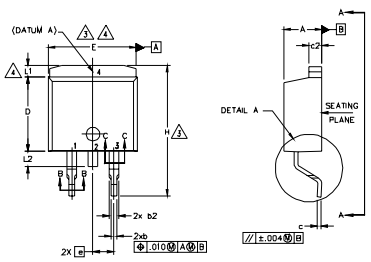
TO-220AB Part Marking Information

EXAMPLE: THIS IS AN IRF1010
LOT CODE 1789
ASSEMBLED ON WW 19, 2000
IN THE ASSEMBLY LINE "C"

Note: "P" in assembly line position indicates "Lead - Free"

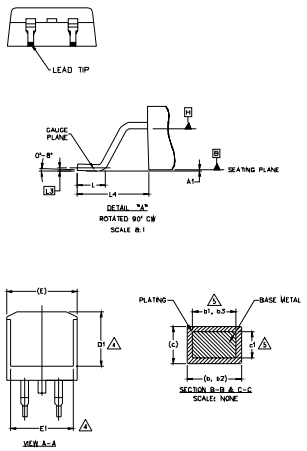


D²Pak Package Outline (Dimensions are shown in millimeters (inches))



NOTES:

1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ASME Y14.5M–1994
2. DIMENSIONS ARE SHOWN IN MILLIMETERS [INCHES].
3. DIMENSION D & E DO NOT INCLUDE MOLD FLASH. MOLD FLASH SHALL NOT EXCEED 0.127 [.005"] PER SIDE. THESE DIMENSIONS ARE MEASURED AT THE OUTMOST EXTREMES OF THE PLASTIC BODY AT DATUM H.
4. THERMAL PAD CONTOUR OPTIONAL WITHIN DIMENSION E, L1, D1 & E1.
5. DIMENSION b1 AND c1 APPLY TO BASE METAL ONLY.
6. DATUM A & B TO BE DETERMINED AT DATUM PLANE H.
7. CONTROLLING DIMENSION: INCH.
8. OUTLINE CONFORMS TO JEDEC OUTLINE TO-263AB.



SYMBOL	DIMENSIONS				NOTES
	MILLIMETERS		INCHES		
	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	
A	4.06	4.83	.160	.190	
A1	0.00	0.254	.000	.010	
b	0.51	0.99	.020	.039	
b1	0.51	0.89	.020	.035	5
b2	1.14	1.78	.045	.070	
b3	1.14	1.73	.045	.068	5
c	0.38	0.74	.015	.029	
c1	0.38	0.58	.015	.023	5
c2	1.14	1.65	.045	.065	
D	8.38	9.65	.330	.380	3
D1	6.86	–	.270		4
E	9.65	10.67	.380	.420	3,4
E1	6.22	–	.245		4
e	2.54 BSC		.100 BSC		
H	14.61	15.88	.575	.625	
L	1.78	2.79	.070	.110	
L1	–	1.65	–	.066	4
L2	1.27	1.78	–	.070	
L3	0.25 BSC		.010 BSC		
L4	4.78	5.28	.188	.208	

LEAD ASSIGNMENTS

HEXFET

1.– GATE
2, 4.– DRAIN
3.– SOURCE

IGBTs, CoPACK

1.– GATE
2, 4.– COLLECTOR
3.– EMITTER

DIODES

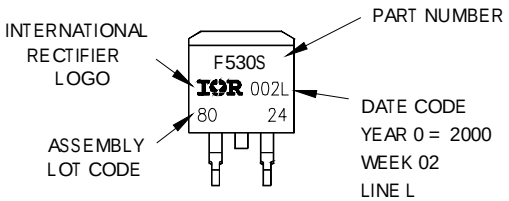
1.– ANODE *
2, 4.– CATHODE
3.– ANODE

* PART DEPENDENT.

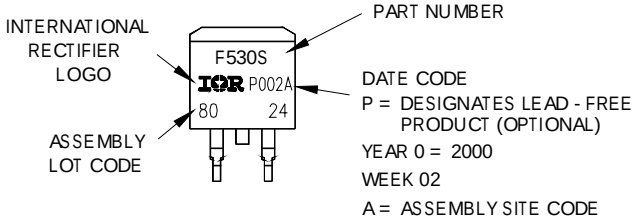
D²Pak Part Marking Information

EXAMPLE: THIS IS AN IRF530S WITH
LOT CODE 8024
ASSEMBLED ON WW 02, 2000
IN THE ASSEMBLY LINE "L"

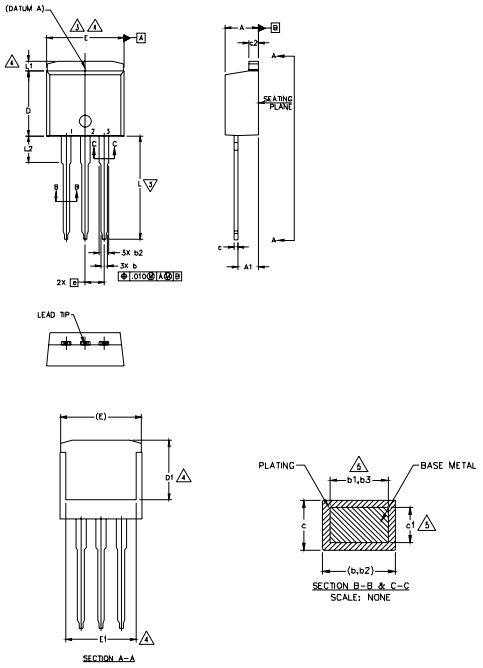
Note: "P" in assembly line position
indicates "Lead – Free"



OR



TO-262 Package Outline (Dimensions are shown in millimeters (inches))



NOTES:

1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ASME Y14.5M-1994
2. DIMENSIONS ARE SHOWN IN MILLIMETERS [INCHES].
3. DIMENSION D & E DO NOT INCLUDE MOLD FLASH. MOLD FLASH SHALL NOT EXCEED 0.127 [.005"] PER SIDE. THESE DIMENSIONS ARE MEASURED AT THE OUTMOST EXTREMES OF THE PLASTIC BODY.
4. THERMAL PAD CONTOUR OPTIONAL WITHIN DIMENSION E, L1, D1 & E1.
5. DIMENSION b1 AND c1 APPLY TO BASE METAL ONLY.
6. CONTROLLING DIMENSION: INCH.
7. - OUTLINE CONFORM TO JEDEC TO-262 EXCEPT A1(max.), b(min.) AND D1(min.) WHERE DIMENSIONS DERIVED THE ACTUAL PACKAGE OUTLINE.

SYMBOL	DIMENSIONS				NOTES
	MILLIMETERS		INCHES		
	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	
A	4.06	4.83	.160	.190	
A1	2.03	3.02	.080	.119	
b	0.51	0.99	.020	.039	
b1	0.51	0.89	.020	.035	5
b2	1.14	1.78	.045	.070	
b3	1.14	1.73	.045	.068	5
c	0.38	0.74	.015	.029	
c1	0.38	0.58	.015	.023	5
c2	1.14	1.65	.045	.065	
D	8.38	9.65	.330	.380	3
D1	6.86	–	.270	–	4
E	9.65	10.67	.380	.420	3,4
E1	6.22	–	.245		4
e	2.54 BSC		.100 BSC		
L	13.46	14.10	.530	.555	
L1	–	1.65	–	.065	4
L2	3.56	3.71	.140	.146	

LEAD ASSIGNMENTS

HEXFET

1.- GATE
2.- DRAIN
3.- SOURCE
4.- DRAIN

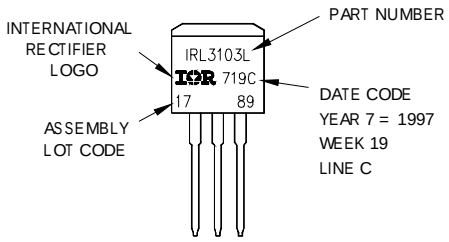
IGBTs, CoPACK

1.- GATE
2.- COLLECTOR
3.- EMITTER
4.- COLLECTOR

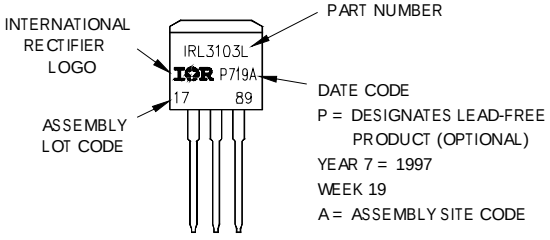
TO-262 Part Marking Information

EXAMPLE: THIS IS AN IRL3103L
LOT CODE 1789
ASSEMBLED ON WW 19, 1997
IN THE ASSEMBLY LINE "C"

Note: "P" in assembly line position indicates "Lead – Free"

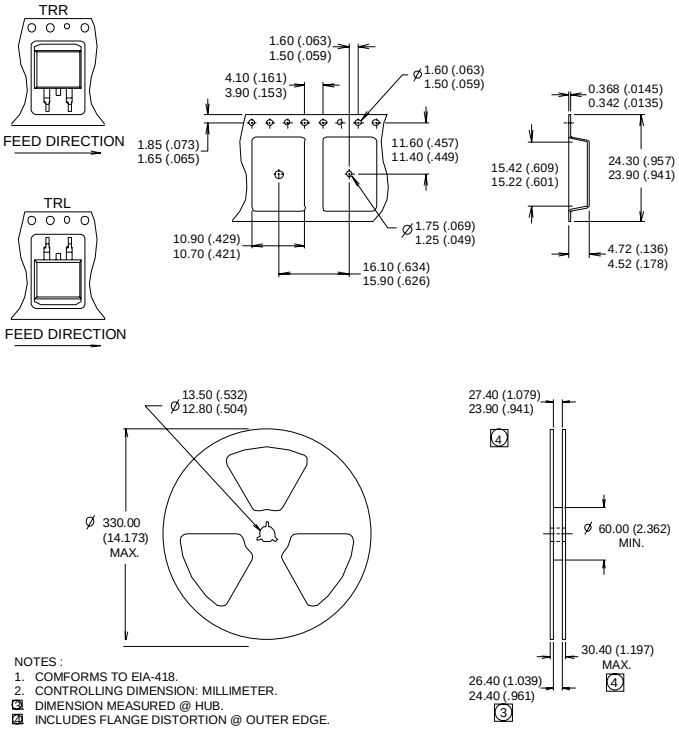


OR



International
IOR Rectifier

D²Pak Tape & Reel Information



Notes:

① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature. (See fig. 11).

② Limited by T_{Jmax}, starting T_J = 25°C, L = 0.11mH R_G = 25Ω, I_{AS} = 75A, V_{GS} =10V. Part not recommended for use above this value.

③ Pulse width ≤ 1.0ms; duty cycle ≤ 2%.

④ C_{oss} eff. is a fixed capacitance that gives the same charging time as C_{oss} while V_{DS} is rising from 0 to 80% V_{DSS} .

⑤ Limited by T_{Jmax} , see Fig.12a, 12b, 15, 16 for typical repetitive avalanche performance.

⑥ This value determined from sample failure population. 100% tested to this value in production.

⑦ This is only applied to TO-220AB pakcage.

⑧ This is applied to D²Pak, when mounted on 1" square PCB (FR-4 or G-10 Material). For recommended footprint and soldering techniques refer to application note #AN-994.

⑨ TO-220 device will have an Rth value of 0.65°C/W.

TO-220AB package is not recommended for Surface Mount Application.

Data and specifications subject to change without notice.
This product has been designed and qualified for the Automotive [Q101]market.
Qualification Standards can be found on IR's Web site.

International
IOR Rectifier

IR WORLD HEADQUARTERS: 233 Kansas St., El Segundo, California 90245, USA Tel: (310) 252-7105
TAC Fax: (310) 252-7903
Visit us at www.irf.com for sales contact information.01/06